



Pro gradu -tutkielma

Meteorologia

PITKITTYYNEET KUIVUUS-, SADE- JA HELLEJAKSOT SUOMEN MUUTTUVASSA
ILMASTOSSA

Jani Räihä

14.9.2018

Ohjaajat: Kirsti Jylhä, Jouni Räisänen

Tarkastajat: Heikki Järvinen, Jouni Räisänen

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

MATEMAATTIS-LUONNONTIEDEKUNTA
MATEMATISK-NATURVETENSKAPLIGA FAKULTETEN
FACULTY OF SCIENCE

Tiedekunta – Fakultet – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree programme Meteorologia	
Tekijä – Författare – Author Jani Räihä			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Pitkittyneet kuivuus-, sade- ja hellejaksot Suomen muuttuvassa ilmastossa			
Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu -tutkielma		Aika – Datum – Month and year Syyskuu 2018	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 51 s. + 2 s. liit.
Tiivistelmä – Referat – Abstract <p>Pitkittyneet kuivuus-, sade- ja hellejaksot ovat erityisen haitallisia maanviljelylle, ja näin ollen on hyödyllistä tutkia, kuinka ilmastomallit tuottavat tällaisia jaksoja sekä havaittuun ilmastoon nähden että tulevaisuudessa RCP8.5-päästöskenaarion (Representative Concentration Pathways) mukaan. Tutkittavana ovat kolmen viikon kuivat- ja sadejaksot sekä kahden viikon hellejaksot. Tässä työssä käytettiin kuuden globaalin kolmiulotteisen kytketyn ilmakehä-valtamerimallin simulaatioiden tuloksia. Mallien simuloimat lämpötilat ja sademäärät alueellistettiin kolmella eri menetelmällä: deltamuutosmenetelmällä, jossa havaintoaineistoa muokataan ilmastomallin ennustamilla muutoksilla, ja kahdella eri harhankorjausmenetelmällä, missä ilmastomallien tuloksia muokataan havaintoaineiston avulla.</p> <p>Ilmastomallien mukaan huhti-syyskuun keskilämpötila nousee Suomessa keskimäärin noin viisi astetta kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 sademäärän kasvaessa noin kymmenen prosenttia. Osittain sademäärän kasvamisen johdosta pitkät kuivat kaudet näyttävät vähenevän tulevaisuudessa ja lämpötilan nousun vuoksi hellejaksojen määrä nousee. Erityisen sateisten jaksojen määrän muutoksesta ei näy selviä merkkejä.</p> <p>Vertailukaudella 1981-2010 harhankorjausmenetelmät tuottivat sekä alueellisesti että kuukausikeskiarvoiltaan havaintoaineistoa tasaisempia jakaumia. Toisaalta deltamuutosmenetelmään nähden harhankorjausmenetelmillä muutokset vertailukaudesta tulevaisuuden jaksoon 2071-2100 olivat alueellisesti ja kuukausikeskiarvoiltaan vaihtelevampia. Varsinkin muutosten suuruutta tarkasteltaessa ilmastomallien välinen hajonta on suurta ja peittää osittain alleen menetelmien välisiä eroja. Paikallisesti muutosten suunta voi olla menetelmästä riippuen eri, jos muutokset alueella ovat pieniä.</p> <p>Erot muutosten luonteessa johtuvat ainakin osittain siitä, että deltamuutosmenetelmissä alueelliset ja ajalliset korrelaatiot pysyvät vertailukauden mukaisina mutta harhankorjauksessa vertailukausi ja tulevaisuuden jakso ovat toisistaan riippumattomat. Menetelmien väliset erot olivat suurimmat kahden viikon hellejaksojen määrissä, jotka molemmat harhankorjausmenetelmät yliarvioivat reilusti vertailukaudella havaintoaineistoon verrattuna. Harhankorjausmenetelmät myös kasvattivat jaksojen määrää ilmaston lämmitessä enemmän kuin deltamuutosmenetelmä, joskin ero oli suhteessa pienempi kuin ero vertailukauden hellejaksojen määrässä.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Ilmastomuutos, ilmastomallit, alueellistaminen, harhankorjaus, deltamuutos			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Sääindeksit	3
3	Tutkimusaineistot	4
3.1	Kasvihuonekaasujen skenaariot	4
3.2	Ilmastomallit	5
3.3	Havaintoaineisto	5
4	Alueellistamismenetelmät	6
4.1	Deltamuutokset	6
4.2	Harhankorjaus	7
5	Vertailumenetelmät	9
6	Alueellistamisen vaikutukset lämpötiloihin ja sademääriin	11
7	Kolmen viikon kuivuusjaksot	15
7.1	Kuivuus kaudella 1981-2010	15
7.2	Kuivuuden muutokset tulevaisuudessa	18
8	Kolmen viikon sadejaksot	23
8.1	Sateisuus kaudella 1981-2010	23
8.2	Sateisuuden muutokset tulevaisuudessa	28
8.2.1	Tulevaisuuden mittapuun mukaan sateiset jaksot	28
8.2.2	Vertailukauden mittapuun mukaan sateiset jaksot	33
9	Kahden viikon hellejaksot	36
9.1	Helteet kaudella 1981-2010	36
9.2	Helteisyyden muutokset tulevaisuudessa	39
9.3	Korrelaatiot kaudella 2071-2100	42
10	Yhteenveto	45
	Kiitokset	48
	Kirjallisuusluettelo	49
	LIITE 1: Suomen ilmastovyöhykkeet	

1 Johdanto

Edellytykset maanviljelylle ovat riippuvaisia ilmasto-oloista, ja sään vuosien välisellä vaihtelulla sekä ääri-ilmiöillä on havaittu vaikutuksia satojen suuruuteen (Hakala et al., 2012). Muuttuva ilmasto aiheuttaa luonnollisesti muutoksia myös kasvien kasvuolosuhteisiin sekä maanviljelysmahdollisuuksiin. Odotettujen ilmastomuutosten myötä satojen voidaan olettaa kasvavan ainakin osassa Suomea (Bindi ja Olesen, 2011; Rötter et al., 2013; Rötter et al., 2011; Tao et al., 2015; Trnka et al., 2014).

Maanviljelystutkimusta varten on kehitetty erityisiä maatalouden sääindeksejä, jotka kertovat viljelyn kannalta haastavista oloista. Näitä indeksejä ovat havaintoaineistojen pohjalta Suomen alueella tutkineet ainakin Peltonen-Sainio et al. 2016a, b, c ja d. Esimerkiksi kuivuus alkukesällä ja erityisen runsaat sateet aiheuttavat sattappioita monille viljalajikkeille, samoin kuin pitkät hellejaksot (Peltonen-Sainio et al., 2011). Maanviljelyn tulevaisuuden kannalta on siis tärkeää pystyä arvioimaan ilmastomuutosten vaikutuksia viljelysolosuhteisiin, ja maatalouden sääindeksejä voi mahdollisesti hyödyntää monessa muussakin sovellutuksessa.

Tulevaisuuden ilmastoa on perinteisesti tutkittu globaalien kolmiulotteisten kytkettyjen ilmakehä-valtamerimallien (GCM = Global Climate Model) avulla, joissa on yleisesti omat osamallinsa kuvaamaan ainakin ilmakehää, meriä ja maanpintaa. Ne toimivat periaatteessa samoin kuin säänennustusmallit mutta niiden alueellinen ja ajallinen erottelukyky on säänennustusmalleja heikompi (Räisänen, 2014). Heikompi erottelukyky ja pitkä ennustusaika aiheuttavat sen, että mallit eivät suoraan sovellu sään ennustamiseen vaan pikemminkin ilmastollisten piirteiden tutkimiseen. Lisäksi heikon erotuskyvyn takia useita merkittäviä meteorologisia ilmiöitä, kuten konvektio, turbulenssi, vesihöyryn tiivistyminen, auringonsäteilyn ja lämpösäteilyn kulku, joudutaan parametrisoimaan (ibid.). Parametrisointi on yleisesti hankalaa ja aiheuttaa omat virheensä malleihin. Ilmastotutkimuksessa pyritäänkin vertailemaan useiden eri mallien tuloksia keskenään parhaiden tuloksien saavuttamiseksi ja mahdollisten mallien virheiden löytämiseksi.

Ilmastomallien mukaan vuoden klimatologisen keskilämpötilan odotetaan nousevan Suomessa noin 2 – 5,5°C ja sademäärän kasvavan noin 6 – 17 % kaudesta 1981-2010

kauteen 2070-2099 kasvihuonekaasupäästöistä riippuen (Ruosteenoja et al., 2016). Kesäaikaan Pohjois-Euroopassa maksimisademäärän ja kuivien jaksojen pituuden puolestaan ennustetaan kasvavan yli 10%, mikä kertoo sadeilmaston muuttumisesta äärevämmäksi (Lehtonen et al., 2014).

On kehitetty useita menetelmiä, joiden avulla ilmastomallien tuloksia voidaan yhdistää havaitun ilmaston ominaisuuksiin (Räisänen ja Rätty, 2013). Yhdistämistä kutsutaan tilastolliseksi alueellistamiseksi (tästä eteenpäin vain alueellistaminen). Alueellistamisen avulla ilmastomallisimulaatioiden tuloksiin saadaan jalostettua lisää yksityiskohtia, jolloin mallien tulosten tulisi vastata myös paremmin todellisuutta. Alueellistamismenetelmät voidaan jakaa deltamuutos- ja harhankorjausmenetelmiin. Deltamuutosmenetelmissä havaintoaineistoa kopioidaan tulevaisuuteen muokkaamalla sitä ilmastomalleista saatavien tietojen avulla, ja harhankorjausmenetelmissä puolestaan muokataan ilmastomallin tuloksia havaintoaineiston mukaan. Samaa alueellistamisalgoritmia voidaan siis käyttää joko deltamuutoksiin tai harhankorjaukseen muuttamalla lähtöasetelmaa. Tilastollisen alueellistamisen lisäksi tai sen sijasta voidaan käyttää niin kutsuttua dynaamista alueellistamista, missä globaali ilmastomalli antaa reunaehdot tarkemman erottelukyvyn alueelliselle ilmastomallille (RCM = Regional Climate Model).

Räisänen ja Rätty (2013) käyttivät useita alueellistamismenetelmiä alueellisten ilmastomallien tuloksille. Heidän mukaansa vuorokauden keskilämpötilaa tutkittaessa kumpikaan lähtöasetelmista (deltamuutos tai harhankorjaus) ei ole yksikäsitteisesti toista parempi tulevaisuuden lämpötilajakaumia tutkittaessa. Lisäksi Räisänen ja Rätty (2013) havaitsivat, että käytetyllä menetelmällä on suurempi vaikutus lämpötilajakauman ääri- kuin keskiarvoihin. Sademäärille Pohjois-Euroopassa sen sijaan havaittiin harhankorjausmenetelmien suoriutuvan deltamuutosmenetelmiä paremmin (Rätty et al., 2014). Kämäräisen (2014) mukaan erityisesti lämpötilasuureiden pitkän ajan ennusteissa (noin 90 vuotta) harhankorjausmenetelmät tuottavat deltamuutosmenetelmiä parempia tuloksia.

Tässä Pro gradu -työssä tutkittavia indeksejä ovat kolmen viikon kuivuus- ja sadejaksot sekä kahden viikon hellejaksot. Näiden indeksien avulla tutkitaan kolmen eri alueellistamismenetelmän eroavaisuuksia käyttäen hyväksi tuloksia kuuden glo-

baalin ilmastomallin simulaatioista. Työssä tutustutaan mainittuihin indekseihin, käytettyihin aineistoihin ja alueellistamismenetelmiin, minkä jälkeen käydään läpi alueellistamisen vaikutukset lämpötiloihin ja sademääriin. Kunkin sääindeksin kohdalla eri menetelmillä harhasta korjattuja ilmastomalleja verrataan vertailukaudella havaintoaineistoon, minkä jälkeen tutkitaan mallien ennustamia muutoksia sekä deltamuutos- että harhankorjausmenetelmillä. Lisäksi tutkitaan indeksien välisiä korrelaatioita, kunkin indeksin aikasarjojen alueellisia korrelaatioita ja kuinka jaksojen määrien muutokset suhteutuvat joko lämpötilan tai sademäärän muutoksen suuruuteen. Lopuksi käydään läpi keskeiset tulokset ennustetuista muutoksista ja alueellistamismenetelmien eroavaisuuksista.

2 Sääindeksit

Indeksit määriteltiin samoin kuin Peltonen-Sainio et al. (2016b, c) sillä erotuksella, että he tarkastelivat kahden viikon kuivuusjaksoja kolmen sijasta. Määritelmät ovat seuraavat:

- Kolmen viikon kuivuusjakson määritelmä täyttyy, jos 21 vuorokauden sadepsumma on alle 10 mm ja jaksoon sisältyy korkeintaan neljä päivää, joina on satanut 0,5 mm tai enemmän.
- Kolmen viikon sadejaksojen määritelmä täyttyy, jos 21 vuorokauden aikana on vähintään kymmenen sadepäivää, jolloin sadetta on saatu vähintään 0,5 mm eikä jakson aikana ole enempää kuin kaksi peräkkäistä poutapäivää missään vaiheessa ja jakson kokonaissademäärä on vähintään 1,5 kertaa kalenterikuukauden klimatologinen sademäärä. Sadejaksojen määrä tulevaisuudessa laskettiin kahdella tavalla: käyttäen klimatologisena sademääränä vertailukautta 1981-2010 ja toisaalta sen kauden omaa ilmastoa, mitä tutkitaan. Ensimmäinen tapa kertoo enemmän kokonaissademäärän muutoksista ja jälkimmäinen tulevan ilmaston mittapuulla keskimääräistä sateisempien jaksojen esiintymisestä.

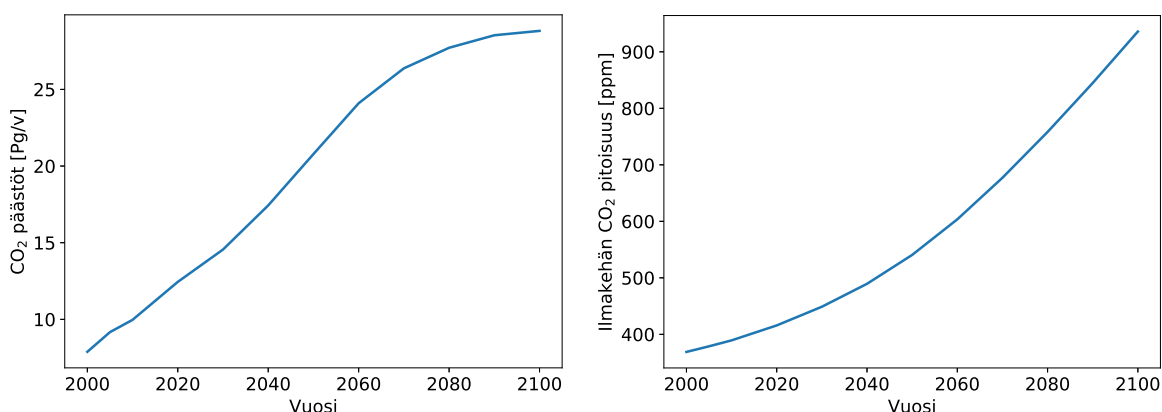
- Kahden viikon hellejakson määritelmä täyttyy, jos 14 vuorokauden jaksolla vuorokauden ylin lämpötila ylittää 25°C vähintään 12 päivänä.

3 Tutkimusaineistot

3.1 Kasvihuonekaasujen skenaariot

Representative Concentration Pathways eli RCP:t ovat tulevaisuuden kasvihuonekaasuskenaarioita (van Vuuren et al., 2011). Skenaarioita on neljä: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ja RCP8.5, missä numero kuvaa kunkin skenaarion mukaista säteilypakotetta (W/m^2) vuonna 2100.

Tässä työssä tarkastellaan RCP8.5-skenaariota eli kaikista suurimpina jatkuvia kasvihuonekaasupäästöjä (kuva 3.1). Tämän skenaarion mukaan maapallon väestö kasvaa 12 miljardiin vuonna 2100, kehitysmaiden sosio-ekonominen kehitys on hidas ja energiantuotanto perustuu myös tulevaisuudessa fossiilisten polttoaineiden käyttöön (Riahi et al., 2011). Vaikka tämä skenaario ei välttämättä ole kaikista realistisin, se on kaikista mielenkiintoisin tämän työn kannalta, sillä myös muutokset maatalouden sääindekseissä voidaan olettaa voimakkaimmiksi tässä skenaariossa.



Kuva 3.1: Vasemmalla RCP8.5-skenaarion mukainen hiilidioksidipäästöjen kehitys maailmanlaajuisena keskiarvona ja oikealla vastaava hiilidioksidipitoisuuden kehitys. Kuvat piirretty RCP Database:n tietojen pohjalta (<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb>, viitattu 15.5.2018)

3.2 Ilmastomallit

Tässä työssä käytetään kuutta eri globaalia kolmiulotteista kytkettyä ilmakehä-valtamerimallia CMIP5-mallivertailuprojektista (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; Taylor et al., 2012). Mallien ominaisuuksia on koottu taulukkoon 3.1. McSweeneyn et al. (2015) mukaan lähes kaikki tässä vertailussa käytetyt mallit kykenevät tuottamaan uskottavan kuvauksen ilmastosta maailmanlaajuisesti pois-lukien CanESM2, jonka tuloksissa Euroopan alueella on ilmakehän kiertoliikkeen osalta harhaa, ja MIROC5, missä vastaava harha on merkittävä.

Taulukko 3.1: Käytetyt ilmastomallit ja niiden ominaisuuksia. Erotuskyvyt ovat vaakasuuntaan ja pyöristettynä yhden desimaalin tarkkuuteen, kaksi arvoa tarkoittaa erotuskykyä päiväntasaajalla ja navoilla ja "x" tarkoittaa, että erotuskykyä ei voida yksikäsitteisesti määrittää johtuen esimerkiksi valitusta koordinaatistosta.

Malli ja alkuperämaa	Erotuskyky: ilmakehä [°]		Erotuskyky: meri [°]		Pystytasojen lkm. ilmakehässä
	leveys	pituus	leveys	pituus	
CanESM2 (Kanada)	2,8	2,8	0,9 - 1,1	1,4	35
MIROC5 (Japani)	1,4	1,4	0,5	1,4	40
CCSM4 (Yhdysvallat)	0,9	1,3	x	x	26
MPI-ESM-MR (Saksa)	1,9	1,9	x	x	95
CNRM-CM5 (Ranska)	1,4	1,4	x	x	31
GFDL-CM3 (Yhdysvallat)	2,0	2,5	0,3 - 1,0	1,0	48

3.3 Havaintoaineisto

Havaintoaineistona käytettiin Suomen kattavaa päivittäistä 10 km x 10 km kriging-interpoloinnilla muodostettua hila-aineistoa, joka kattaa vuodet 1961-2014 ja useita meteorologisia suureita (Aalto et al., 2016). Tässä työssä käytettiin vuorokauden keski- ja maksimilämpötiloja sekä sademääriä. Aineiston on todettu vastaavan asemahavaintoja erinomaisesti muun muassa lämpötilojen osalta ja riittävän hyvin sademäärien osalta (ibid.). Aineisto on saatavilla osoitteesta <https://avaa.tdata.fi/web/paituli/latauspalvelu>.

4 Alueellistamismenetelmät

Tässä työssä vertailukautena käytetään jaksoa 1981-2010 ja menetelmiä sovelletaan kuhunkin 30-vuotisjaksoon (1981-2010, 2011-2040, 2041-2070 ja 2071-2100) erikseen. Alueellistamista varten kaikki ilmastomallitulokset interpoloitiin bilineaarisesti samaan 10 km x 10 km hilaan havaintoaineiston kanssa. Käytettyjen symbolien selitykset on koottu taulukkoon 4.1.

Alueellistamismenetelmien nimeämisessä käytetään Räisäsen ja Rädyn (2013) mukaista nimeämistä lämpötiloille ja Rädyn et al. (2014) mukaista nimeämistä sademäärälle.

Taulukko 4.1: Symbolien selitykset.

Symboli	Selite
T	vuorokauden keskilämpötila
T_{max}	vuorokauden maksimilämpötila
P	vuorokauden sademäärä
s_{hav}	s havaintoaineistossa
s_{kor}	korjattu s
s_{vert}	s vertailukaudella ilmastomallissa
s_{ske}	s tulevaisuuden jaksolla ilmastomallissa
\bar{s}	30 vuorokauden liukuva klimatologinen s :n keskiarvo deltamuutosmenetelmissä ja klimatologinen kuukausikeskiarvo harhankorjausmenetelmissä
σ_s	30 vuorokauden liukuva klimatologinen s :n keskihajonta deltamuutosmenetelmissä ja klimatologinen kuukausikeskihajonta harhankorjausmenetelmissä

4.1 Deltamuutokset

Havaintoaineiston keskilämpötila muokattiin tulevaa ilmastoa vastaavaksi ilmastomallien simuloimien muutosten avulla M2-menetelmällä ja sademäärä M3-menetelmällä. Nämä ovat deltamuutosmenetelmiä, ja tästä syystä voidaan jokaiselle päivälle laskea realistinen kuuden mallin tulosten keskiarvo (jatkossa lyhyemmin mallikeskiarvo) kullekin suurelle ilman, että päivittäinen vaihtelu pienenee. Tästä syystä tätä aineistoa voidaan pitää parhaana arviona tulevaisuuden päivittäiselle ilmastolle.

Vuorokauden keskilämpötila korjattiin M2-menetelmän mukaisesti

$$T_{kor} = T_{hav} + (\bar{T}_{ske} - \bar{T}_{vert}) + \left(\frac{\sigma_{T,ske}}{\sigma_{T,vert}} - 1 \right) (T_{hav} - \bar{T}_{hav}). \quad (1)$$

Menetelmä huomioi siis lineaarisen muutoksen klimatologisissa keskiarvoissa ja suhteellisen muutoksen klimatologisissa keskihajonnoissa (Räisänen ja Rätty, 2013). Tämän jälkeen vuorokauden maksimilämpötilat laskettiin seuraavasti:

$$Tmax_{kor} = T_{kor} + \left(\frac{\overline{Tmax}_{ske} - \bar{T}_{ske}}{\overline{Tmax}_{vert} - \bar{T}_{vert}} \right) (Tmax_{hav} - T_{hav}). \quad (2)$$

Menetelmä ottaa huomioon maksimi- ja keskilämpötilan erotuksen suhteellisen muutoksen. Vuorokauden sademäärä korjattiin Rädyn et al. (2014) M3-menetelmän mukaisesti yhtälöllä

$$P_{kor} = aP_{hav}^b \quad (3)$$

missä potenssi b lasketaan iteratiivisesti siten, että havaitun sademäärän 65 vuorokauden liukuva klimatologinen variaatiokerroin muuttuu samassa suhteessa kuin ilmastomallin vastaava. Tämän jälkeen kerroin a määritetään siten, että sademäärän suhteellinen muutos on sama kuin ilmastomallin ennustama klimatologinen muutos. Leanderin ja Buishandin (2007) tavoin vakiot a ja b lasketaan erikseen joka viidennelle päivälle eli samoilla kertoimilla operoidaan aina viiden päivän jaksoa. Lisäksi kertoimet pysyvät samoina kunkin 30-vuotisjakson sisällä.

4.2 Harhankorjaus

M7-menetelmä lämpötiloille ja M6-menetelmä sademäärälle ovat muodoltaan identtiset, joten seuraavaa yhtälöä voidaan soveltaa molempiin suureisiin (esitetään keskilämpötilalle).

$$T_{kor} = T_{ske} + (\bar{T}_{hav} - \bar{T}_{vert}) + \left(\frac{\sigma_{T,hav}}{\sigma_{T,vert}} - 1 \right) (T_{ske} - \bar{T}_{ske}) \quad (4)$$

Huomataan, että tämä vastaa muodoltaan yhtälöä (1). Menetelmät vastaavatkin toisiaan mutta lähestymistapa on vain eri, sillä siinä missä M2-menetelmässä havaintoaineistoa muokataan mallin ennustamalla muutoksilla, M7- ja M6-menetelmissä ilmastomallin tuloksia muokataan havaintojen avulla. Sademäärän tapauksessa menetelmää joudutaan soveltamaan iteratiivisesti, sillä sademäärälle saattaa tulla negatiivisia arvoja ja negatiivisten arvojen nollaksi asettamisen jälkeen muutokset eivät enää vastaisikaan ilmastomallin ennustamia muutoksia. Maksimilämpötila korjattiin iteratiivisesti kuten sademäärä siten, että korjattavana suureena on T :n sijasta $(T_{max} - T)$, joka sitten lisättiin jo korjattuun keskilämpötilaan.

M9-menetelmä keskilämpötilalle ja M8-menetelmä sademäärälle ovat identtiset kvantiilikorjausmenetelmät, joten esitetään menetelmä vain keskilämpötilalle. Korjaus tehdään yhtälön

$$T_{kor} = F_{hav}^{-1}(F_{vert}(T_{ske})) \quad (5)$$

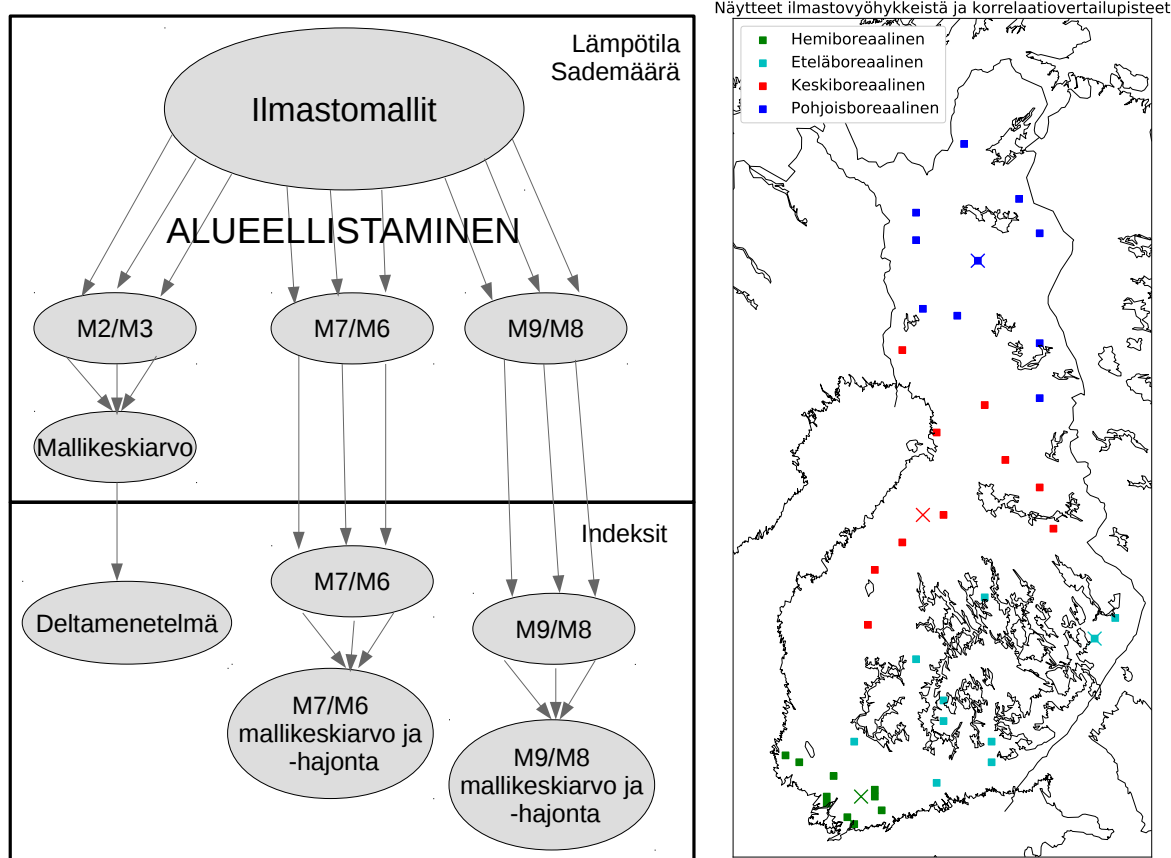
mukaisesti, missä F tarkoittaa kumulatiivista kertymäfunktioita ja F^{-1} sen käänteisfunktioita. Maksimilämpötiloja varten jälleen korjattiin suuretta $(T_{max} - T)$ ja muodostettiin lopullinen arvo lisäämällä tämä jo korjattuun keskilämpötilaan.

Sekä lämpötilojen että sademäärän tapauksessa kertymäfunktio jaettiin tuhanteen kvantiiliin, ja lämpötilojen tapauksessa korjausfunktioita tasoitettiin hieman liukuvalla keskiarvolla ennen korjauksen tekemistä (Räisänen ja Rätty, 2013). Kvantiilikorjauksen jälkeen vuorokauden lämpötiloihin lisättiin vielä vakiotermi ja sademäärälle vakiokerroin, jotta keskiarvon muutokset vastaisivat ilmastomallin muutoksia.

Tässä työssä käytettiin Matti Kämäräisen laskemia tuloksia harhasta korjatuille ilmastomallisimulaatioille.

5 Vertailumenetelmät

Indeksit laskettiin jokaiselle harhasta korjatulle ilmastomallille erikseen, minkä jälkeen niistä laskettiin jälleen mallikeskiarvo ja mallien välinen keskihajonta. Deltamuutosmenetelmässä indeksit laskettiin käyttäen mallikeskiarvoa päivittäisistä M2-menetelmällä korjatuista lämpötiloista ja M3-menetelmällä korjatuista sademääristä ja tästä aineistosta käytetään tästä eteenpäin nimitystä deltamenetelmä. Prosessia on havainnollistettu kuvassa 5.1.



Kuva 5.1: Vasemmalla kaaviokuva eri aineistojen muodostamisesta, jossa kolme nuolta kuvaavat käytettyjä kuutta ilmastomallia ja yksi nuoli mallikeskiarvoa. Oikealla kymmenen hilapisteen näytteet kultakin ilmastovyöhykkeeltä (neliöt) ja pisteet, joiden suhteen laskettiin alueelliset korrelaatiot (rastit). Ilmastovyöhykkeitä kuvataan tarkemmin liitteessä 1.

Kaikki indeksit laskettiin liukuvasti jokaiselle päivälle, siten että ensimmäinen mahdollinen jakso alkaa 1.4. ja viimeinen mahdollinen jakso päättyy 30.9. Tämän jälkeen mukaan poimittiin ainoastaan erillisten jaksoiden määrä, eli jaksot eivät voi olla päällekkäin. Esimerkiksi yhtäjaksoinen kuuden viikon kuivuus tuottaisi kaksi kolmen viikon kuivuusjaksoa mutta viiden viikon yhtäjaksoinen kuivuus ainoastaan

yhden.

Indeksien kuukausittasta esiintymistä tutkittiin neljällä eri ilmastovyöhykkeillä erikseen. Indeksien määrä laskettiin keskiarvona kymmenestä pisteestä kultakin vyöhykkeeltä (kuva 5.1). Pisteet valittiin näennäissummittaisesti käsin siten, että kukin ilmastovyöhyke tulisi mahdollisimman hyvin alueellisesti edustetuksi huomioonottaen maatalouden vaatimukset (hilaruutu pääosin maata). Alueiden supistaminen kymmeneen pisteeseen tehtiin laskenta-ajan säästämiseksi. Ilmastovyöhykkeiden piirteitä on esitelty liitteessä 1.

Jaksojen vuotuisten määrien aikasarjojen alueellista korrelaatiota tutkittiin siten, että jokaisesta ilmastovyöhykkeestä valittiin yksi piste, minkä suhteen laskettiin korrelaatiot kaikissa muissa hilapisteissä (kuva 5.1). Tulososiossa esitetään näistä neljästä pisteestä kahden subjektiivisesti mielenkiintoisimman vertailupisteen tulokset.

Deltamenetelmässä jaksoiden määrän muutosten merkitsevyyttä tutkittiin Wilcoxonin testin avulla (Wilcoxon, 1945). Testi vertailee kahta jakaumaa keskenään tekemättä oletuksia suureiden jakaumista. Vertailussa käytettiin indeksien vuotuisten määrien jakaumia vertailukaudelta ja tulevaisuuden jaksolta.

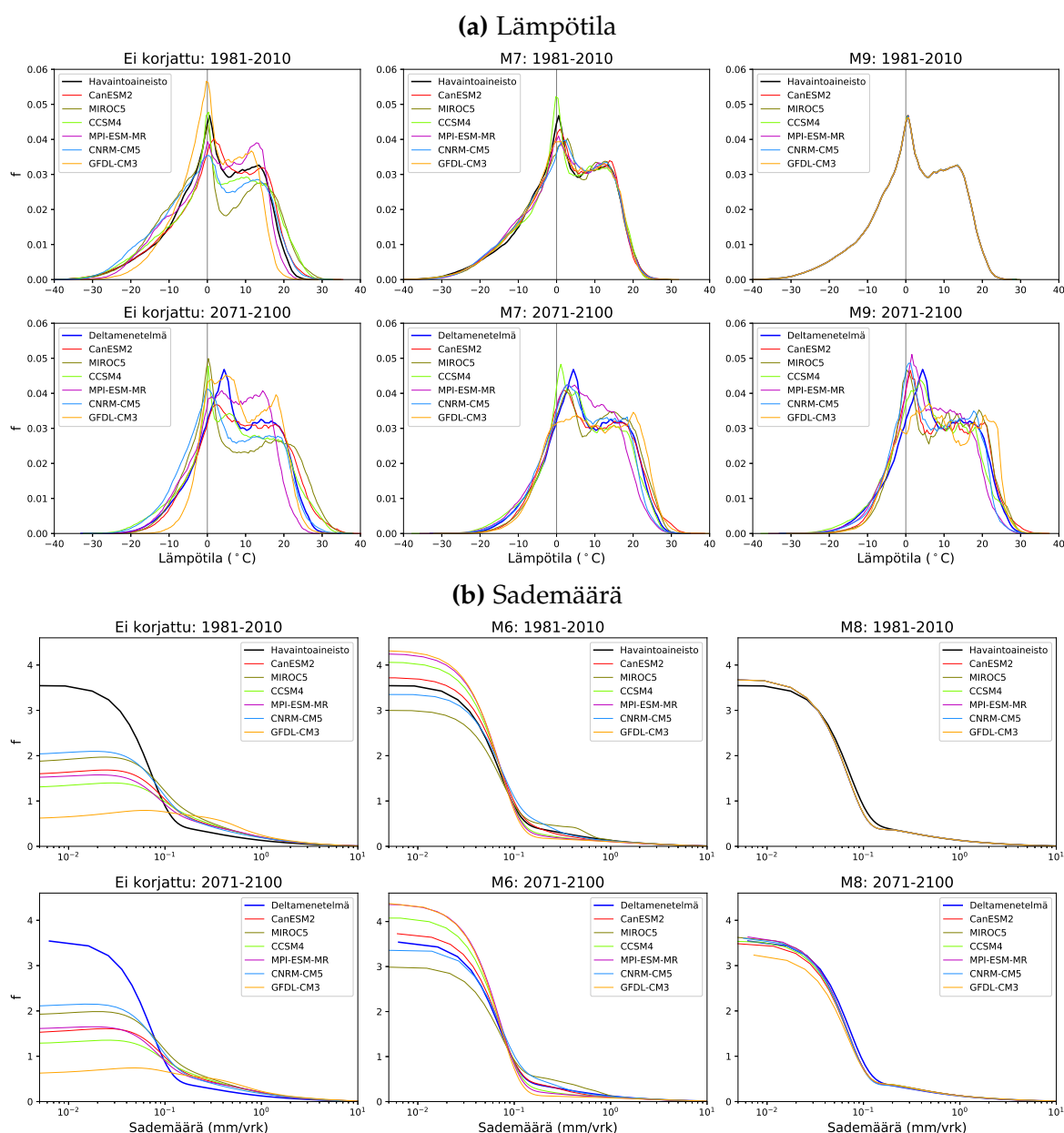
Harhasta korjattujen mallisumulaatioiden eroja havaintoihin ja deltamenetelmään tutkittiin laskemalla jokaiselle ilmastomallille erot erikseen ja laskemalla sitten erojen mallikeskiarvo ja -hajonta. Jos erojen keskihajonta ylittää erojen keskiarvon, voidaan päätellä, että merkitsevää eroa verrattuun aineistoon ei voida sanoa olevan ja jos ylitys on vähintään kaksinkertainen, merkitsevyys pienenee entisestään. Tällainen tulkinta voidaan tehdä sillä oletuksella, että eri mallien tulokset ovat normaalisti jakautuneet (Student, 1908).

Jaksojen määrän ja sademäärän tai lämpötilan muutosten suuruuksia vertaamalla tutkittiin systemaattisia kaikkiin ilmastomalleihin vaikuttavia eroja harhankorjausmenetelmien välillä. Lisäksi tällainen vertailu voi paljastaa mahdollisia lineaarisia tai epälineaarisia riippuvuuksia muutosten suuruuksien välillä.

6 Alueellistamisen vaikutukset lämpötiloihin ja sademääriin

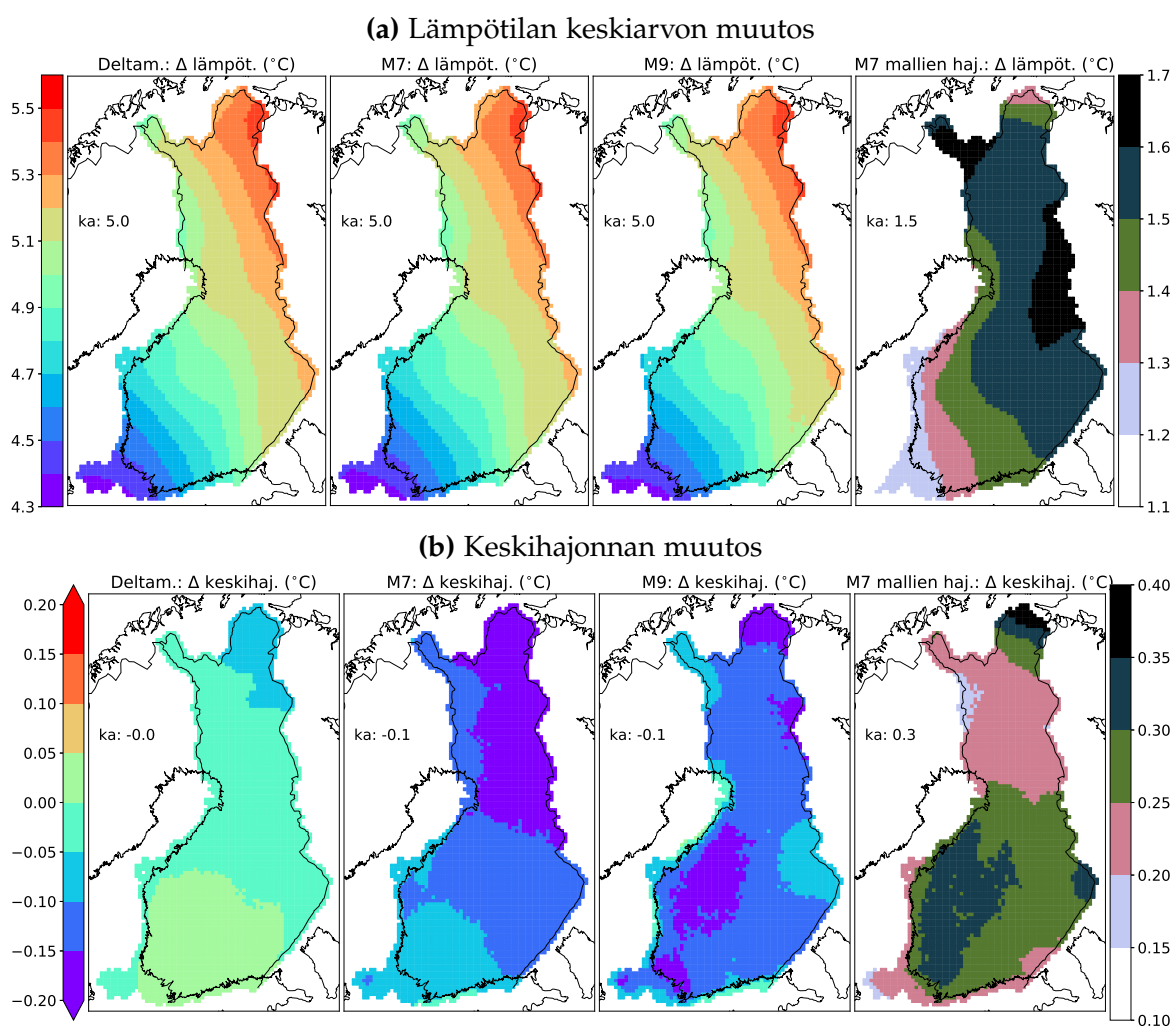
Kuvassa 6.1 on esitetty päivittäisten keskilämpötilojen ja sademäärien jakaumat vertailukaudella 1981-2010 ja tulevaisuuden jaksolla 2071-2100. Kuvista voidaan havaita seuraavaa:

- Mallien korjaamattomat tulokset eroavat toisistaan paljon enemmän kuin harhasta korjatut erityisesti vertailukaudella.
- Varsinkin pienten sademäärien (0,1 mm/vrk – 1 mm/vrk) esiintyvyyttä korjaamattomat mallit yliarvioivat reilusti, mikä todennäköisesti johtuu mallien karkeasta alkuperäishilasta, jolloin suurelle hilaruudulle osuu edes jonkin verran sadetta suurella todennäköisyydellä.
- Vertailukaudella kvantiilikorjausmenetelmät korjaavat mallien jakaumat lähes täysin havaintoaineistoa vastaaviksi ja M7/M6-menetelmäkin huomattavasti havaintoaineistoa lähemmäs.
- Deltamuutosmenetelmällä useimmin esiintyvä lämpötila on siirtynyt nolasta muutamaan plusasteeseen kaudella 2071-2100, mikä ei ole fysikaalisesti järkevää ja voi aiheuttaa ongelmia. M7-menetelmällä samaa siirtymistä esiintyy myös, mutta M9-menetelmä kykenee säilyttämään maksimitodennäköisyyden lähellä nollaa useilla malleilla.



Kuva 6.1: Päivittäisten keskilämpötilojen ja sademäärien jakaumat koko Suomen alueelta sekä korjaamattomilla että alueellistetuilla ilmastomalleilla RCP8.5-skenaariossa. Deltamenetelmästä esitetään mallikeskiarvo, ja sademäärät esitetään logaritmisella asteikolla.

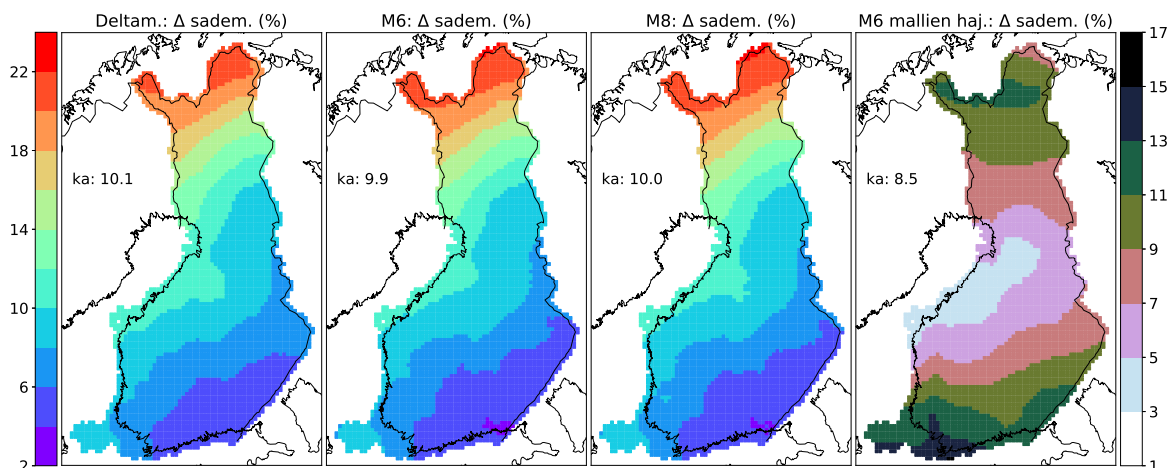
Tarkastelukuukausina (huhti-syyskuu) lämpötila nousee vertailukaudesta kauteen 2071-2100 kuvan 6.2 mukaisesti 5°C sekä deltamuutos- että harhankorjausmenetelmillä. Muutoksen suuruus on Ahvenanmaan reilusta neljästä maan koillisosien reiluun viiteen asteeseen. Lämpenemisarvioiden hajonta muutosten suhteen on pienintä länsirannikolla ja suurinta itärajalla ja käsivarren Lapissa. Huhti-syyskuun keskilämpötilan vuosien välinen keskihajonta ei käytännössä muutu ja mallien välinen hajontakin on melko pieni.



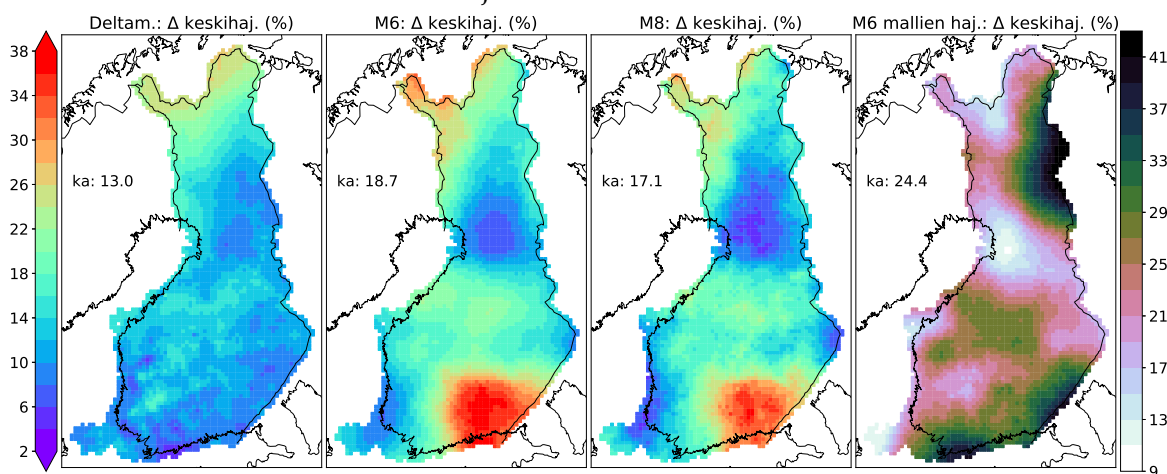
Kuva 6.2: Kesäkauden (1.4.-30.9.) keskilämpötilan keskiarvon ja vuosien välisen keskihajonnan muutokset deltamuutosmenetelmän päivittäisistä mallikeskiarvoista ja harhankorjausmenetelmien mallikeskiarvona kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 eri alueellistamismenetelmillä laskettuna. Oikealla mallien välinen keskihajonta M7-menetelmällä.

Myös huhti-syyskuun sademäärän ennustetaan kasvavan (kuva 6.3). Suhteelliset muutokset ovat Kaakkois-Suomen alle kuudesta Pohjois-Lapin reiluun 20 prosentin kasvuun ja hyvin samankaltaiset kaikilla alueellistamismenetelmillä. Suhteellisesti mallien välinen hajonta on suurinta maan eteläosassa, missä se ylittää keskimääräisen muutoksen reilusti. Vuosien välisen keskihajonnan muutoksissa menetelmien välillä on kuitenkin jonkin verran eroja: M3- eli deltamuutosmenetelmällä hajonta kasvaa keskimäärin noin 13% etelärannikon muutamasta Pohjois-Lapin yli 20 prosenttiin; M6-menetelmällä hajonta kasvaa keskimäärin noin 19% ja reilusti yli 30% kasvua löytyy maan eteläosista; M8-menetelmällä hajonta kasvaa keskimäärin noin 17% ja alueellinen jakuma on M6-menetelmän kaltainen. M6-menetelmällä vuosien välisen hajonnan muutokset vaihtelevat mallien välillä eniten Itä-Lapissa.

(a) Sademäärän suhteellinen muutos



(b) Keskihajonnan suhteellinen muutos



Kuva 6.3: Kesäkauden (1.4.-30.9.) sademäärän ja vuosien välisen keskihajonnan suhteelliset muutokset deltamuutosmenetelmän päivittäisistä mallikeskiarvoista ja harhankorjausmenetelmien mallikeskiarvona kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 eri alueellistamismenetelmillä laskettuna. Oikealla mallien välinen keskihajonta M6-menetelmällä.

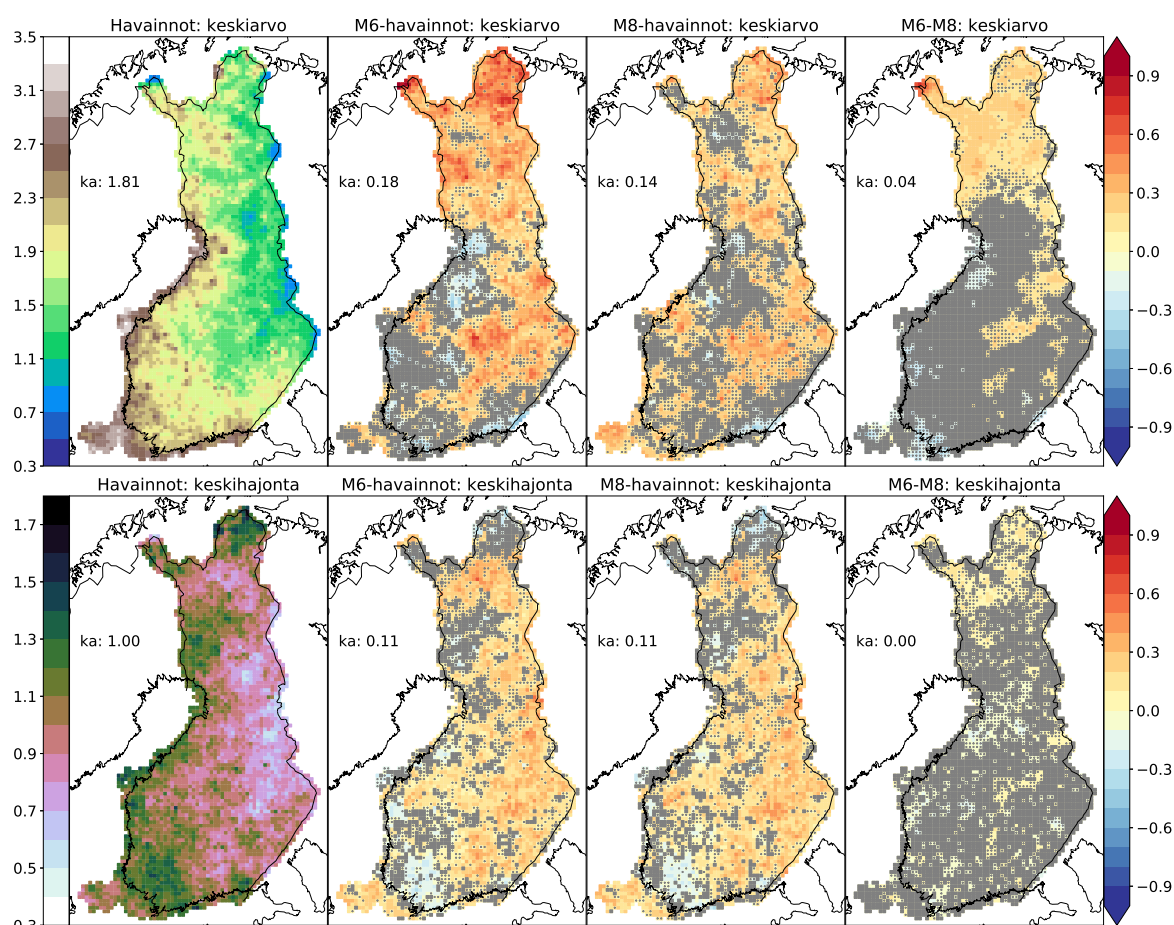
Sekä lämpötilan että sademäärän osalta muutosten suuruudet Suomessa keskimäärin vastaavat Ruosteenojan et al. (2016) tuloksia, vaikka tässä työssä on käytössä vain pieni osa heidän käyttämistään ilmastomallisimulaatioiden tuloksista. Pienet erot deltamenetelmän ja harhankorjausmenetelmien välillä johtuvat siitä, että deltamenetelmällä on käytetty liukuvia keskiarvoja mutta harhankorjausmenetelmillä kuukausikeskiarvoja.

7 Kolmen viikon kuivuusjaksot

7.1 Kuivuus kaudella 1981-2010

Kuvassa 7.1 esitetään havaintojen mukaisen kolmen viikon kuivuusjaksojen määrän vuosikeskiarvo ja vuosien välinen hajonta sekä se, kuinka M6- ja M8-menetelmällä korjattujen mallien keskiarvo poikkeaa havaitusta.

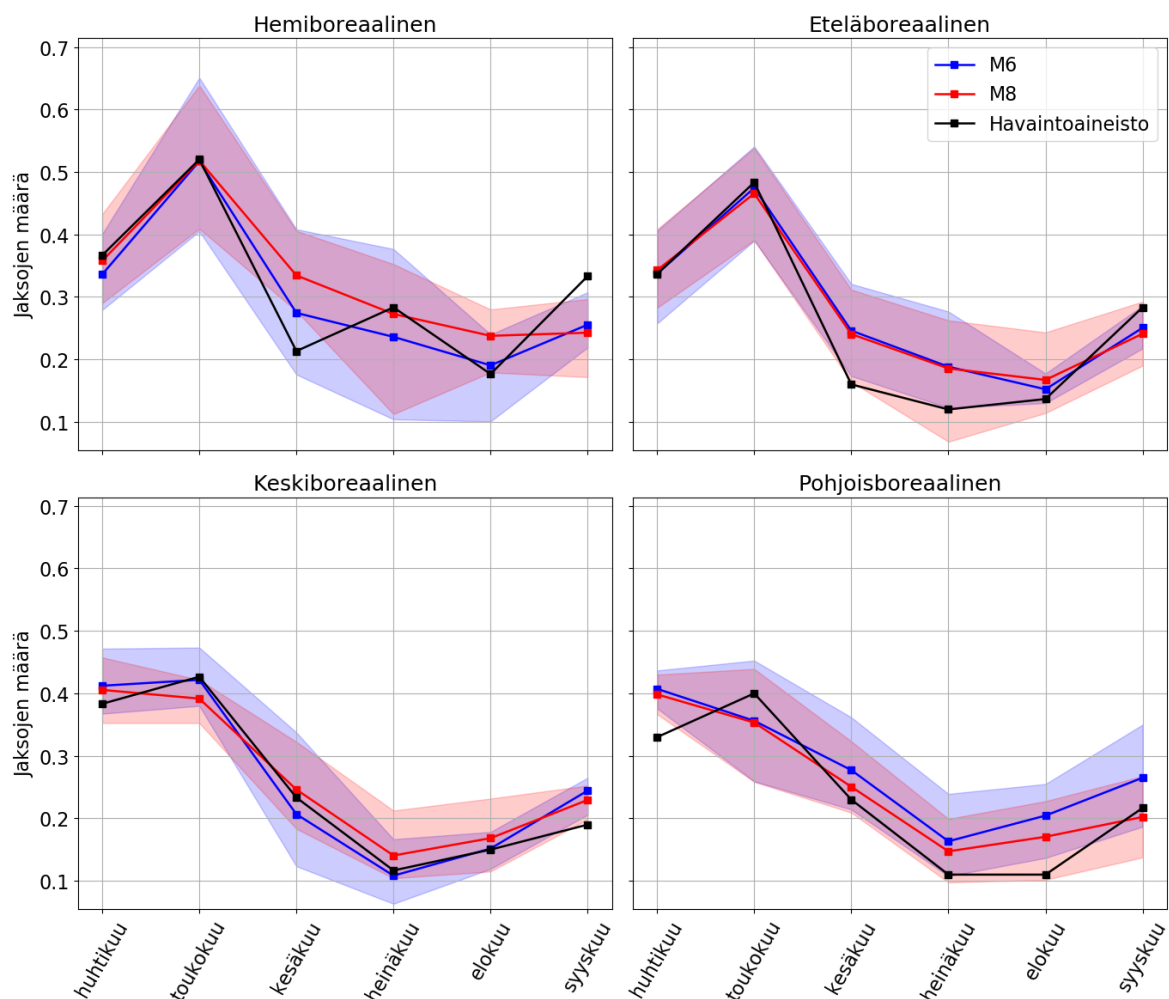
Havaintoaineiston mukaan Itämeren rannikkolla on jopa neljä kertaa enemmän kuivia jaksoja kuin itärajalla koko Suomen keskiarvon ollessa noin 1,8 jaksoa vuodessa. Jaksojen määrä vaihtelee kuitenkin paljon vuodesta toiseen, sillä vuosien välinen keskihajonta on 1,0 jaksoa vuodessa. Vuosien välinen hajonta on suhteellisesti suurinta Pohjois-Lapissa, missä keskiarvo ja -hajonta ovat lähes yhtä suuria.



Kuva 7.1: Kolmen viikon kuivien jaksoiden määrä vuodessa vertailukaudella. Keskihajonnat kuvaavat vuosien välistä hajontaa. Mallien keskiarvo- ja keskihajontakarttoihin on merkitty harmaat pisteet hilaruutuihin, joissa mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Keskimäärin molemmat harhankorjausmenetelmät tuottavat vajaat 10% enemmän jaksoja kuin on havaittu. M6-menetelmä tuottaa Pohjois-Lappiin jopa 50% enemmän ja sisämaahan yleisesti hieman enemmän jaksoja kuin on havaintoaineistossa. Muutamalla alueella rannikolla ja Pohjanmaalla jaksoja puolestaan on havaittua vähemmän ja keskimäärin alueellinen jakautuminen on havaittua tasaisempi.

M8-menetelmä on lähempänä havaintoaineistoa kuin M6-menetelmä sekä keskiarvossa että alueellisesti lähes koko maassa. Ero M6- ja M8-menetelmien välillä näkyy merkitsevimmin Lapissa suurempina arvoina M6-menetelmällä korjatuissa malleissa. Sekä M6- että M8-menetelmillä hajontojen erot havaittuun ovat lähes identtiset; hajonnat ovat keskimäärin havaintoaineistoa reilut 10% suuremmat ja alueellisesti tasaisemmin jakautuneet.



Kuva 7.2: Kolmen viikon kuivien jaksoiden määrä kuukausittain vertailukaudella. Eri vyöhykkeiden arvot on laskettu kymmenen hilapisteen keskiarvona (kuva 5.1). Jakson päätymispäivä määrää kuukauden, värjättyt alueet kuvaavat mallien välisen jakauman 5- ja 95-prosenttipisteitä ja viivat mallikeskiarvoja.

Kuivien jaksojen keskimääräinen jakautuminen eri kuukausille eri vyöhykkeillä on esitetty kuvassa 7.2. Havaintoaineistossa kaikilla ilmastovyöhykkeillä on maksimi toukokuussa päättyvillä jaksoilla ja vähiten jaksoja on heinä- tai elokuussa päättyvillä jaksoilla, minkä jälkeen jaksojen määrä nousee jälleen syyskuussa. Huhtikuussa päättyvien jaksojen vähäinen määrä johtuu todennäköisesti siitä, että ensimmäinen mahdollinen jakso päättyy 21.4. ja päättymispäivä määrää kuukauden.

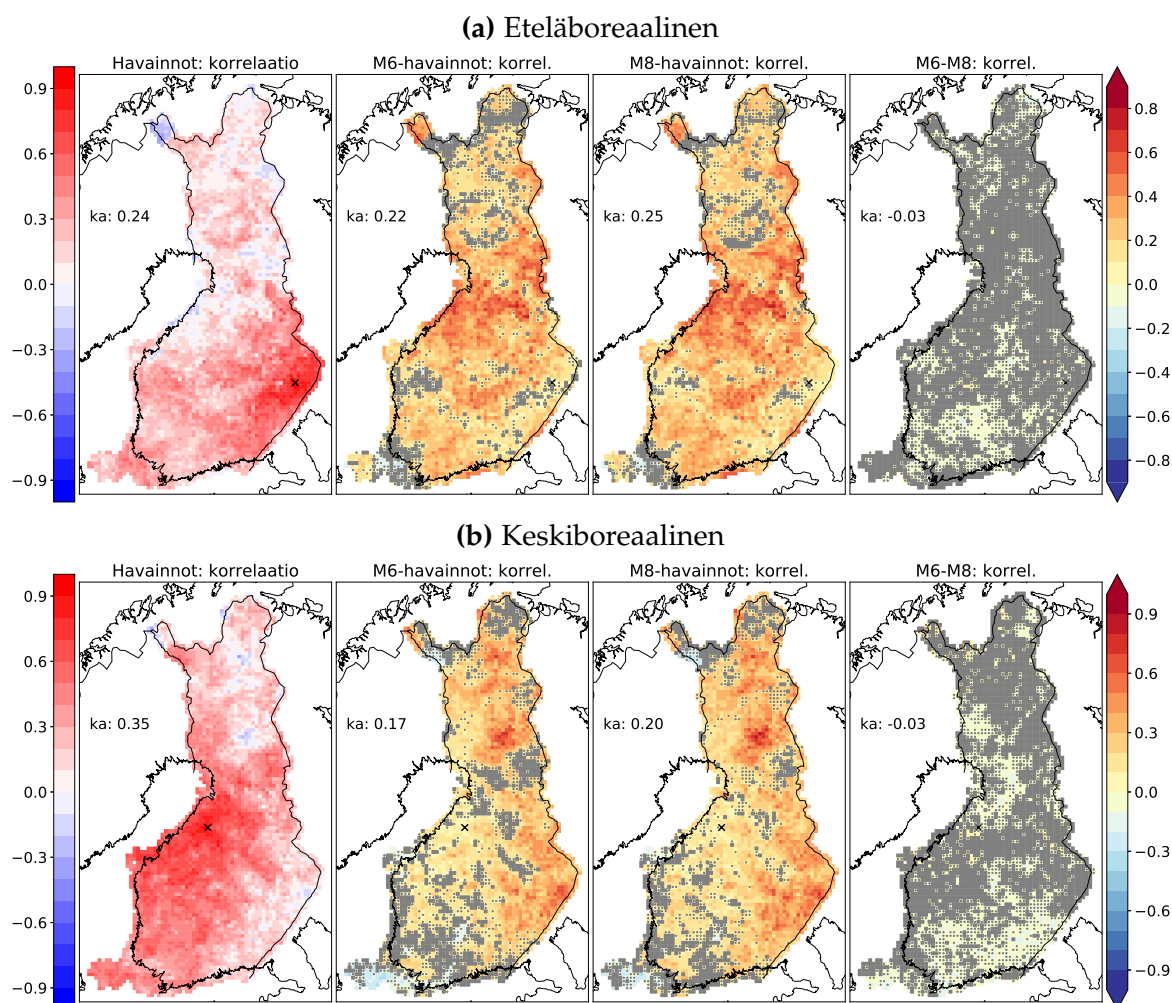
Keskimäärin harhasta korjatuissa malleissa kuukausittainen vaihtelu toteutuu hyvin, joskin osalla vyöhykkeistä tiettyinä kuukausina havaintojen mukainen määrä ei mahdu mallien 5- ja 95-prosenttipisteiden väliin, jolloin mallikeskiarvo eroaa merkittävästi havaintoaineistosta. Erityisen suuri suhteellinen ero on pohjoisboreaalissa elokuussa, jolloin M6-menetelmän mukaan jaksoja on lähes kaksinkertainen määrä havaintoihin nähden. Lisäksi vuoden sisäinen sykli on hieman voimakkaampi havaintoaineistossa kuin harhasta korjatuilla malleilla. Tässä suhteessa selkeitä eroja harhankorjausmenetelmien välillä ole.

Mallien välinen hajonta on hieman suurempaa hemiboreaalissa kuin muilla alueilla, mikä voi johtua siitä, että alue on lähellä meren rantaan, missä ilmastomallien alunperin karkea hila voi aiheuttaa epäluotettavuutta.

Kuvassa 7.3 tarkastellaan, kuinka kuivien jaksojen esiintyminen Suomen eri osissa korreloi kahden eri vertailupisteen (yksi Pohjois-Karjalassa eteläboreaalisisella ja toinen Pohjois-Pohjanmaalla keskiboreaalisisella vyöhykkeellä) kanssa. Havaintoaineiston mukaan kuivien jaksojen aikasarjojen alueellisista korrelaatioista löytyy sekä positiivisen että negatiivisen korrelaation alueita keskiarvojen ollessa positiivisiä molempien esitettyjen pisteiden suhteen. Negatiivinen korrelaatio tarkoittaa, että alueella on ollut keskimääräistä vähemmän kuivia jaksoja silloin kun vertailupisteessä on ollut keskimääräistä enemmän, ja päin vastoin. Tällaiset alueet ovat kuitenkin pieniä, ja korrelaatiot ovat vain heikosti negatiivisia.

Harhankorjausmenetelmien välillä ei ole juurikaan eroa korrelaatioiden suhteen, ja molemmilla menetelmillä korrelaatiot ovat keskimäärin huomattavasti havaittua suurempia ja koko maassa positiivisia. Yleisesti alueellinen jakautuminen on tasaisempaa harhasta korjatuissa aineistoissa kuin havaintoaineistossa. Kahden muun

vertailupisteen suhteen tarkasteltuna aineistojen väliset erot ovat pienemmät.



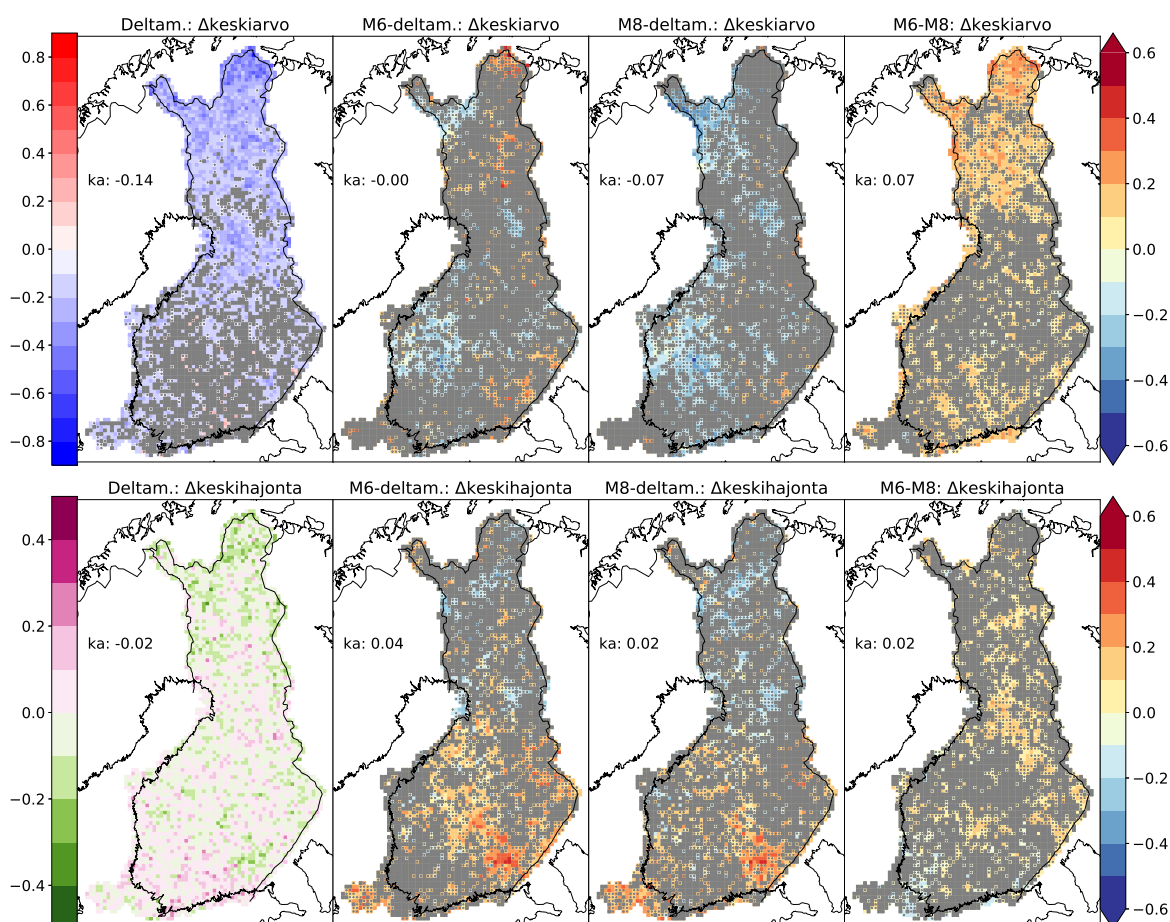
Kuva 7.3: Kolmen viikon kuivien jaksojen vuosittaisten määrien korrelaatiot rastilla merkityn pisteen suhteen vertailukaudella. Mallien keskiarvokarttoihin on merkitty harmaa piste, jos mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

7.2 Kuivuuden muutokset tulevaisuudessa

Kolmen viikon kuivien jaksojen määrän muutokset vertailukaudesta kauteen 2071-2100 on esitetty kuvassa 7.4. Deltamenetelmällä jaksojen määrä vähenee lähes koko maassa muutoksen suuruuden ollessa keskimäärin noin 7%. Muutokset ovat merkitseviä yli puolen Suomen alueella, erityisesti pohjoisosassa maata.

M6-menetelmällä keskimääräinen muutos on saman suuruinen deltamenetelmän kanssa mutta mallien välinen hajonta on suurta, sillä osassa pisteitä, missä ero deltamenetelmään on deltamenetelmän muutoksen kanssa samaa luokkaa, on mallien

välinen keskihajonta ylittänyt keskiarvon. Puolestaan M8-menetelmällä keskimääräinen muutos on hieman deltamenetelmää voimakkaampi, mutta jälleen mallien välinen hajonta on suurta ja selkeitä eroja deltamenetelmään voi löytää lähinnä maan länsiosista ja Enontekiön alueelta Lapista. Selkeimmät erot M6- ja M8-menetelmillä korjattujen aineistojen välillä ovat myös Lapissa, missä M6-menetelmällä kuivuusjakso harvenevat noin 0,2 jaksoa vähemmän kuin M8-menetelmällä.

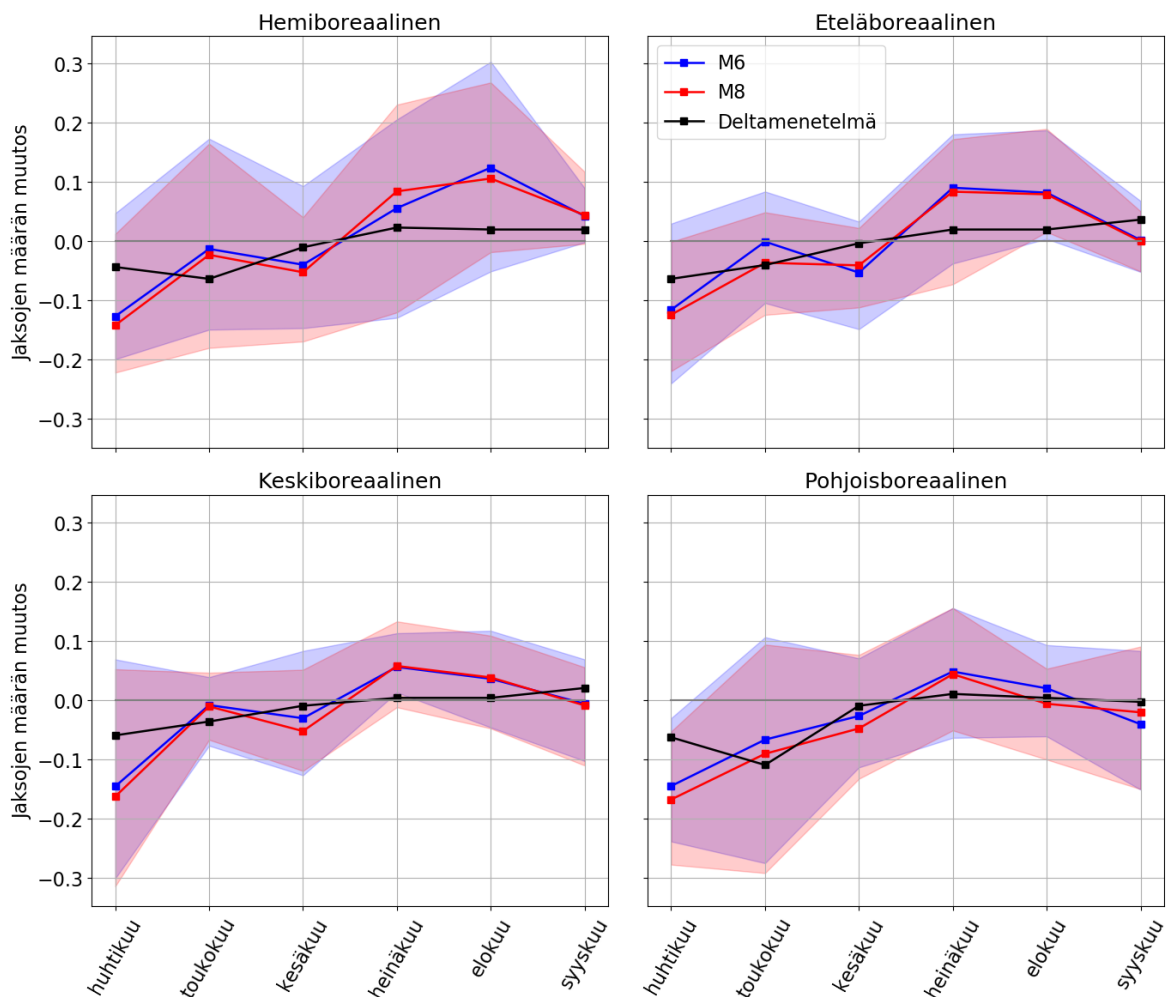


Kuva 7.4: Muutokset kolmen kuivan viikon jaksojen vuotuisessa määrässä ja vuosien välisessä keskihajonnassa kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100. Muutosten merkitsevyyttä deltamenetelmällä on tutkittu Wilcoxonin testin avulla (H_0 : ei muutosta; harmaa piste tarkoittaa p-arvoa yli 5% ja kokonaan harmaa ruutu p-arvoa yli 10%). Mallien keskiarvo- ja keskihajontakarttoihin on merkitty harmaat pisteet hilaruutuhin, joissa mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Deltamenetelmällä vuosien välisen hajonnan muutokset ovat pieniä ja keskimäärin lähellä nollaa. Suurimmat negatiiviset muutokset ovat Lapin alueella, missä myös jaksojen määrä vähenee eniten ja toisaalta lieviä positiivisia muutoksia löytyy maan eteläosista.

M6-menetelmällä keskihajonta jopa kasvaisi hieman ollen erityisesti deltamenetelmää positiivisempi kaakkoisosassa maata, missä tosin myös muutosten keskiarvo on positiivisempi kuin deltamenetelmällä. M8-menetelmällä keskihajonnan erot deltamenetelmään ovat samansuuntaisia mutta pienempiä kuin M6-menetelmällä eikä selkeitä alueellisia eroja keskihajontojen muutoksissa menetelmien välillä havaita.

Kuvassa 7.5 havaitaan, että keski- ja pohjoisboreaalien jaksojen väheneminen deltamenetelmällä johtuu jaksojen määrän vähenemisestä erityisesti huhti- ja toukokuussa päättyvillä jaksoilla. Myös hemi- ja eteläborealisilla alueilla on deltamenetelmällä vähenemistä samoina kuukausina, mutta lievää kasvua heinä-syyskuussa päättyvillä jaksoilla, mikä tasoittaa vuosikeskiarvon muutokset pieniksi.



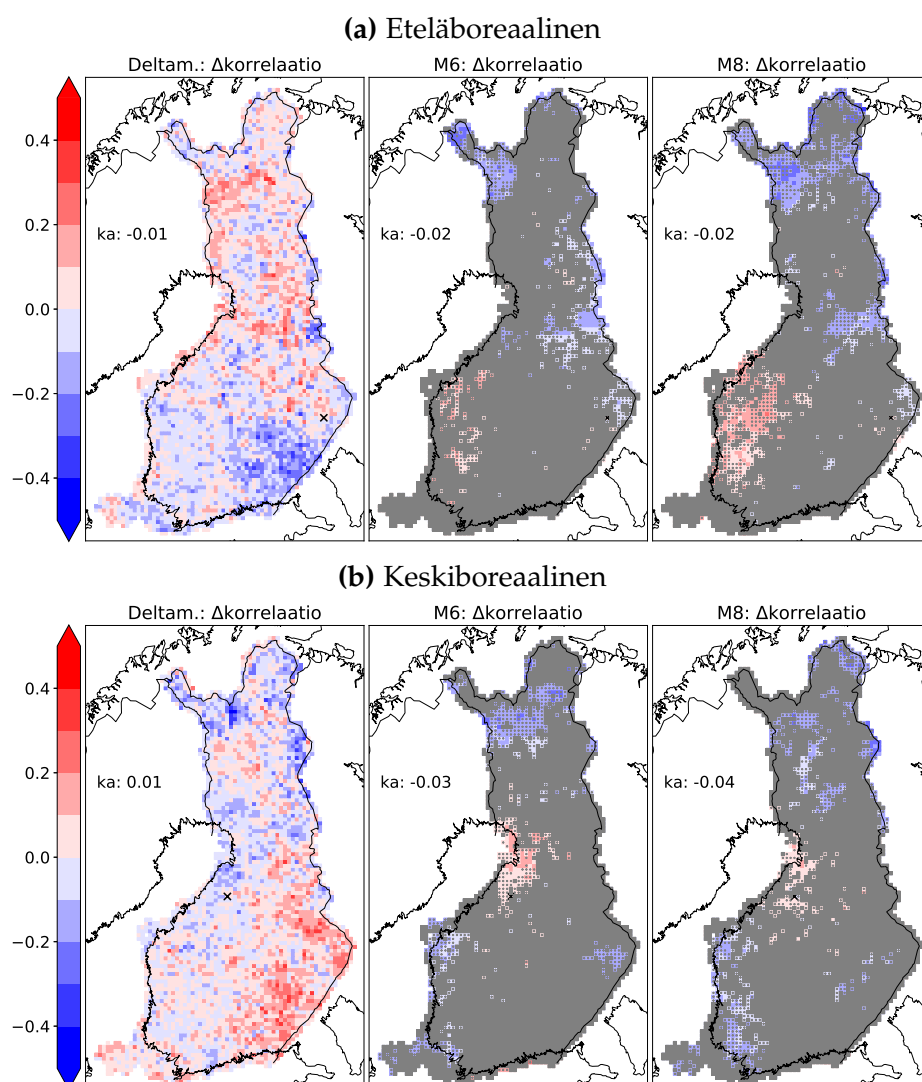
Kuva 7.5: Kolmen viikon kuivien jaksojen kuukausittaisen määrien muutokset kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100. Eri vyöhykkeiden arvot on laskettu kymmenen hilapisteen keskiarvona (kuva 5.1). Jakson päättymispäivä määrää kuukauden, värjätty alueet kuvaavat mallien välisen jakauman 5- ja 95-prosenttipisteitä ja viivat mallikeskiarvoja.

Sekä M6- että M8-menetelmillä mallien välinen hajonta on muutoksiin nähden suurta ja ainoastaan pohjoisboreaalaisella alueella huhtikuussa päättyvillä jaksoilla kuivuusjaksot vähenevät, ja eteläboreaalaisella alueella elokuussa päättyvillä jaksoilla kuivuusjaksot lisääntyvät merkitsevästi. Molemmilla harhankorjausmenetelmillä mallikeskiarvojen muutokset kuukausittain ovat yleensä samansuuntaisia mutta voimakkaampia kuin deltamenetelmällä.

Kaikissa aineistoissa vuoden sisäinen sykli (kuva 7.2) tasoittuu hieman tulevaisuuden ilmastossa. Tasoittuminen on voimakkaampaa M6- ja M8- menetelmillä kuin deltamenetelmällä. Lisäksi toukokuun maksimi kuivuusjaksojen määrässä suhteessa huhti- ja kesäkuussa päättyviin jaksoihin korostuu M6- ja M8-menetelmillä muilla alueilla paitsi pohjoisboreaalissa. Tämä tuo toisaalta kesäkuun arvoja hemi- ja eteläboreaalissa lähemmäs deltamenetelmää kuin vertailukauden aikana.

Keskimäärin alueelliset korrelaatiot eivät muutu paljon deltamenetelmällä eivätkä kummallakaan harhankorjausmenetelmällä (kuva 7.6). Alueellisesti muutokset voivat olla suuriakin ja huomattavaa on, että niille harvoille alueille, missä on nähtävissä muutos korrelaatiossa M6- ja M8-menetelmillä, muutos on usein etumerkiltään eri deltamenetelmän muutokseen verrattuna.

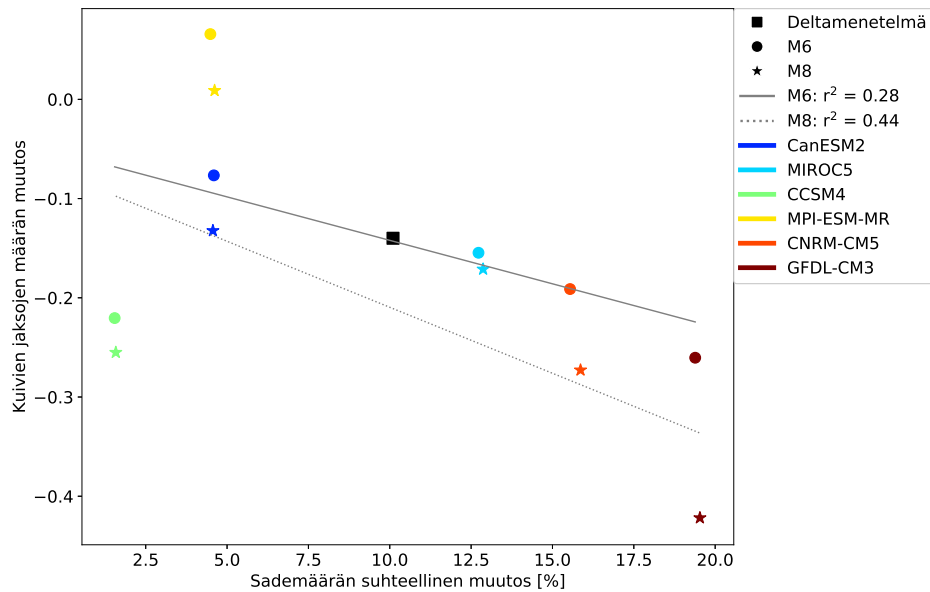
Vertailukaudella Lapin alueella M6- ja M8-menetelmillä alueelliset korrelaatiot ovat lähes poikkeuksetta suurempia kuin deltamenetelmällä (kuva 7.3), mutta korrelaatioiden muutokset ovat puolestaan negatiivisia samalla alueella molempien tarkastelupisteiden suhteen laskettuna. Samaa ei havaita deltamenetelmällä vaan muutosten etumerkki vaihtelee eri pisteiden suhteen tarkasteltaessa (hemi- ja pohjoisboreaalisten pisteiden suhteen ei näytetä).



Kuva 7.6: Kolmen viikon kuivien jaksojen vuosittaisten määrien korrelaatioiden muutokset kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 rastilla merkityn pisteen suhteen. Mallien keskiarvokartoissa on harmaa piste, jos mallien välisten muutosten keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Kuivien jaksojen määrän muutosten suhdetta sademäärän muutokseen tutkitaan kuvassa 7.7. Havaitaan, että ilmastomallien mukaan osa kuivien jaksojen vähentymisestä selittyy keskimääräisen sademäärän kasvulla, vaikka mukana on yksi malli, jossa sekä sademäärä että kuivien jaksojen määrä lisääntyy (MPI-ESM-MR). Lisäksi havaitaan, että M8-menetelmällä kaikilla malleilla sademäärän kasvu on samaa luokkaa M6-menetelmän kanssa mutta kuivien jaksojen määrät vähenevät enemmän. Myös korrelaatio sademäärän muutosten ja kuivien jaksojen määrän muutosten välillä on voimakkaampi M8-menetelmällä kuin M6-menetelmällä. Suurin ero M6- ja M8-menetelmällä on mallilla, jossa myös sademäärän kasvu on voimakkainta

(GFDL-CM3).



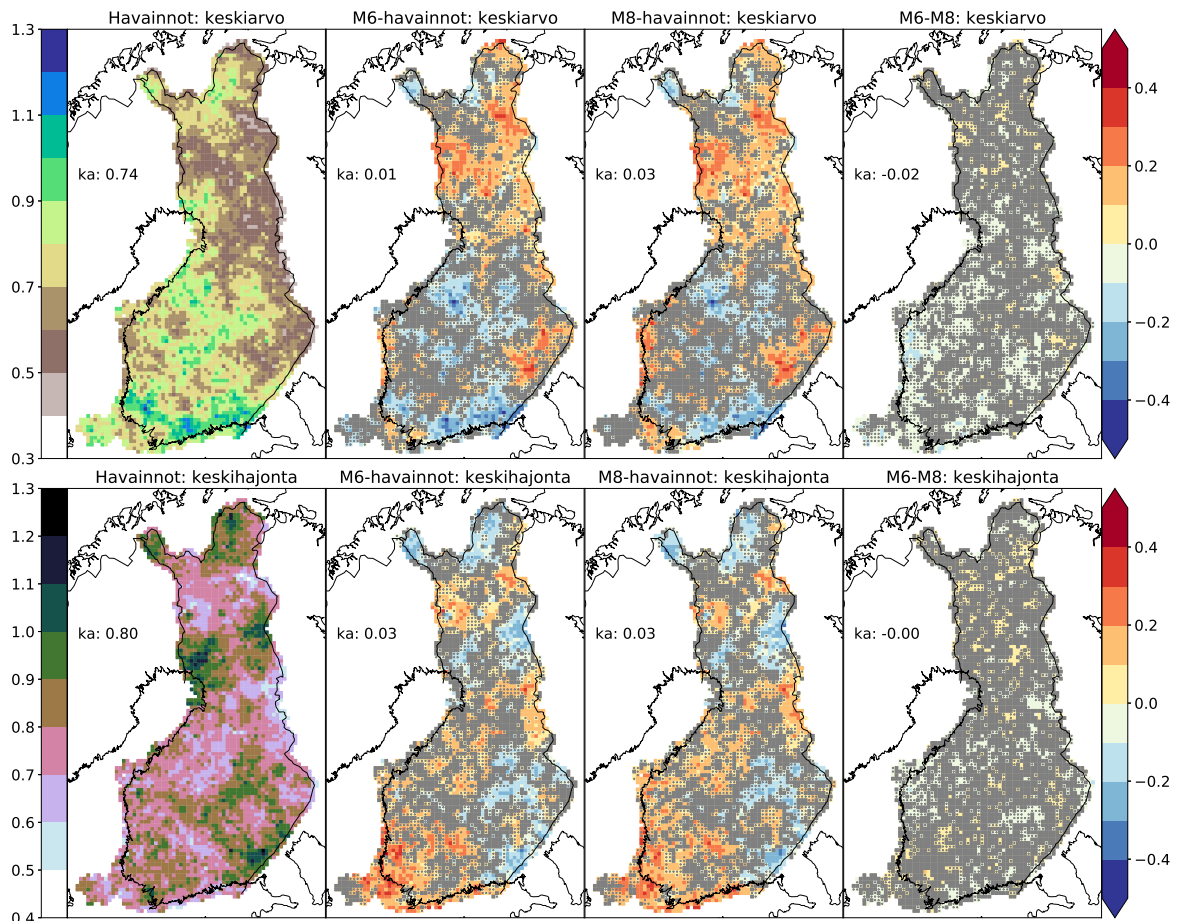
Kuva 7.7: Kolmen viikon kuivien jaksoiden määrien muutokset huhti-syyskuussa kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 sademäärien suhteellisten muutosten funktiona eri malleilla ja harhankorjausmenetelmillä. Tarkastelu on suoritettu koko Suomen keskiarvoille ja suorien sovituksia on tehty pienemmän neliösumman menetelmällä. Suure r^2 kuvaa, kuinka hyvin sademäärän muutos selittää jaksoiden määrän muutosta.

8 Kolmen viikon sadejaksot

8.1 Sateisuus kaudella 1981-2010

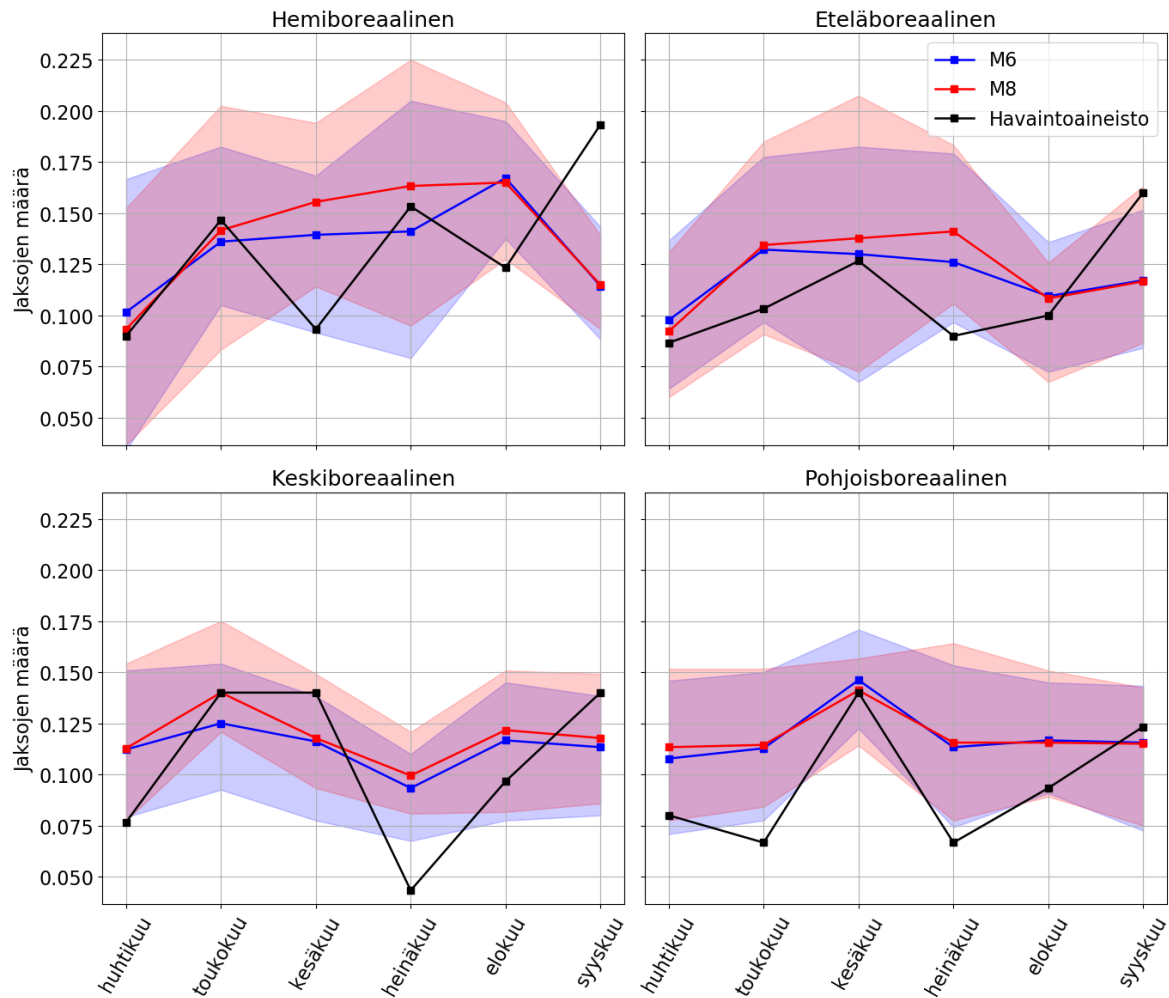
Kolmen viikon sadejaksoja on havaintojen mukaan (kuva 8.1) vertailukaudella keskimäärin Suomessa 0,74 vuodessa alueellisen minimin ollessa alle 0,5 ja maksimin yli 1,2 jaksoa vuodessa. Yleisesti voidaan sanoa, että eniten pitkiä sadejaksoja on ollut eteläisessä Suomessa ja vähiten itärajan tuntumassa, Lapin keskiosassa ja Pohjois-Pohjanmaalla.

Vuosien välinen hajonta on vertailukaudella havaintoaineiston mukaan keskimäärin 0,8 jaksoa vuodessa, joka on suurempi kuin keskiarvo, mikä kertoo suuresta vaihtelusta sadejaksojen määrässä vuosittain. Suhteellisesti vuosien välinen vaihtelu on suurinta Lapissa ja erityisesti sen kaakkois- ja lounaisosissa.



Kuva 8.1: Kolmen viikon sateisten jaksojen määrä vuodessa vertailukaudella. Keskihajonnat kuvaavat vuosien välistä hajontaa. Mallien keskiarvo- ja keskihajontakarttoihin on merkitty harmaat pisteet hilaruutuihin, joissa mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Koko maan keskiarvossa ja keskihajonnassa M6-menetelmä on hyvin lähellä havaintoaineistoa ja myös erot M8-menetelmän ja havaintoaineiston välillä ovat alle 5%. Alueellinen jakauma on sekä M6- että M8-menetelmissä huomattavasti havaintoaineistoa tasaisempaa sekä keskiarvon että keskihajonnan osalta, mikä nähdään siitä, että alueilla missä on keskimääräistä vähemmän sadejaksoja, ovat erotukset $M6 - \text{havainnot}$ ja $M8 - \text{havainnot}$ positiivisia, ja päin vastoin. Erot M6- ja M8-menetelmien välillä jaksojen määrässä ovat pieniä mutta M8-menetelmä näyttäisi antavan melko tasaisesti hieman suurempia arvoja ympäri maan kuin M6-menetelmä.

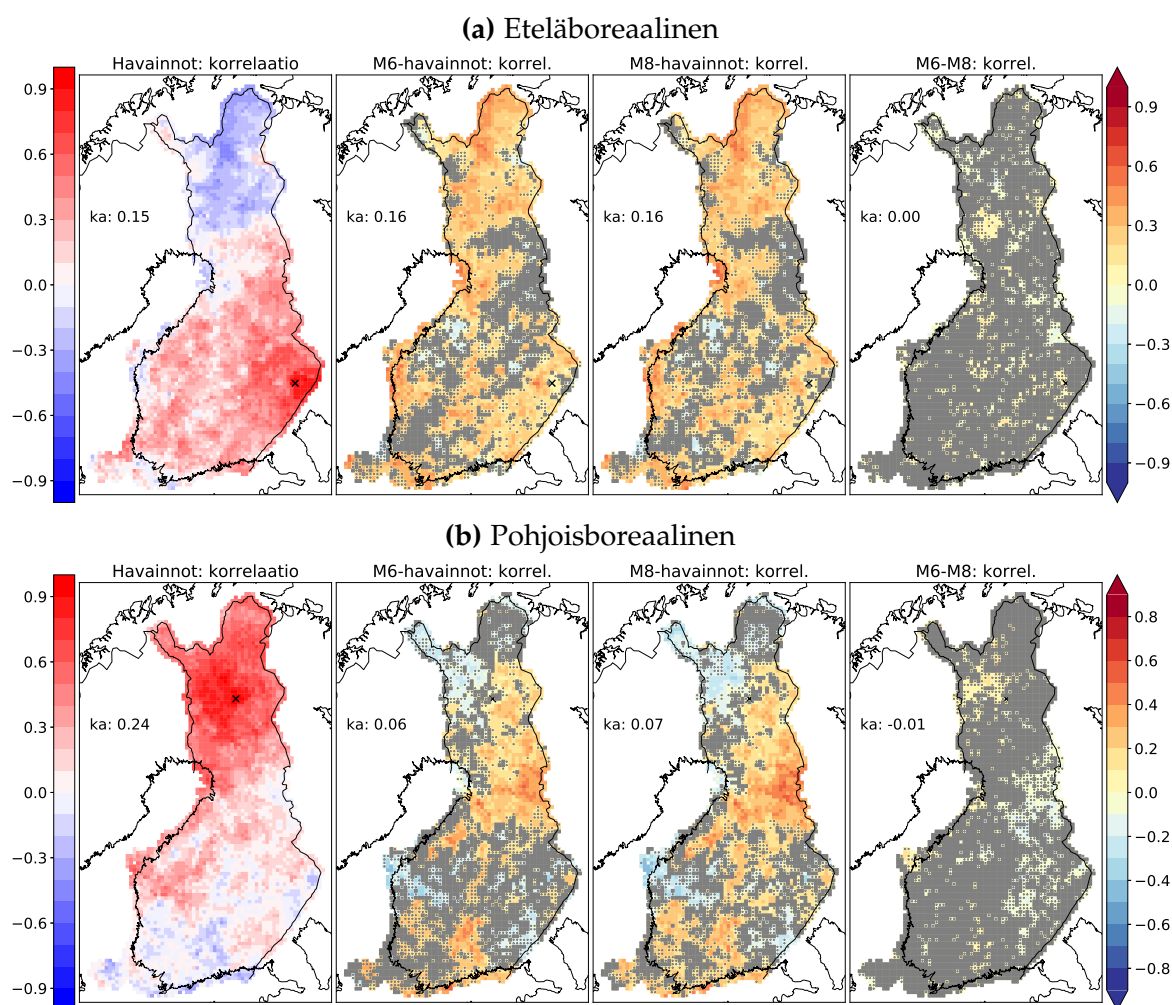


Kuva 8.2: Kolmen viikon sateisten jaksojen määrä kuukausittain vertailukaudella. Eri vyöhykkeiden arvot on laskettu kymmenen hilapisteen keskiarvona (kuva 5.1). Jakson päätymispäivä määrää kuukauden, värjätty alueet kuvaavat mallien välisen jakauman 5- ja 95-prosenttipisteitä ja viivat mallikeskiarvoja.

Sadejaksojen määrän vuoden sisäistä sykliä havaintoaineistossa tutkittaessa kuvassa 8.2 havaitaan, että alueiden välillä on hieman eroja, mutta kaikilla alueilla sykli näyttäisi pääpiirteissään olevan seuraavanlainen: vähän sadejaksoja huhtikuussa päättyvillä jaksoilla; paikallinen maksimi touko- tai kesäkuussa päättyvillä jaksoilla; määrä pienenee heinä- tai elokuussa päättyvillä jaksoilla ja nousee jälleen syyskuussa päättyvillä jaksoilla. Huhtikuussa päättyvien jaksojen vähäinen määrä johtuu todennäköisesti siitä, että ensimmäinen mahdollinen jakso päättyy 21.4. ja päätymispäivä määrää kuukauden. Lisäksi paikallinen vaihtelu sadejaksojen havaitussa määrässä on suurta, mikä saattaa aiheuttaa epävarmuutta erityisesti havaintoaineiston vyöhykekeskiarvoihin.

Kummallakaan harhankorjausmenetelmällä tämä sykli ei täysin toteudu ja kuu-

kausien väliset erot ovat havaintoaineistoa pienempiä. Erityisesti jaksojen määrän kasvu loppukesältä syyskuuhun jää molemmilla menetelmillä liian pieneksi tai sitä ei havaita lainkaan. Juuri havaintoaineiston kesän minimi tai syyskuun maksimi jää usein mallien välisen jakauman 5- ja 95-prosenttipisteiden ulkopuolelle, eikä tämän tarkastelun perusteella voida sanoa, suoriutuuko toinen harhankorjausmenetelmä toista paremmin.



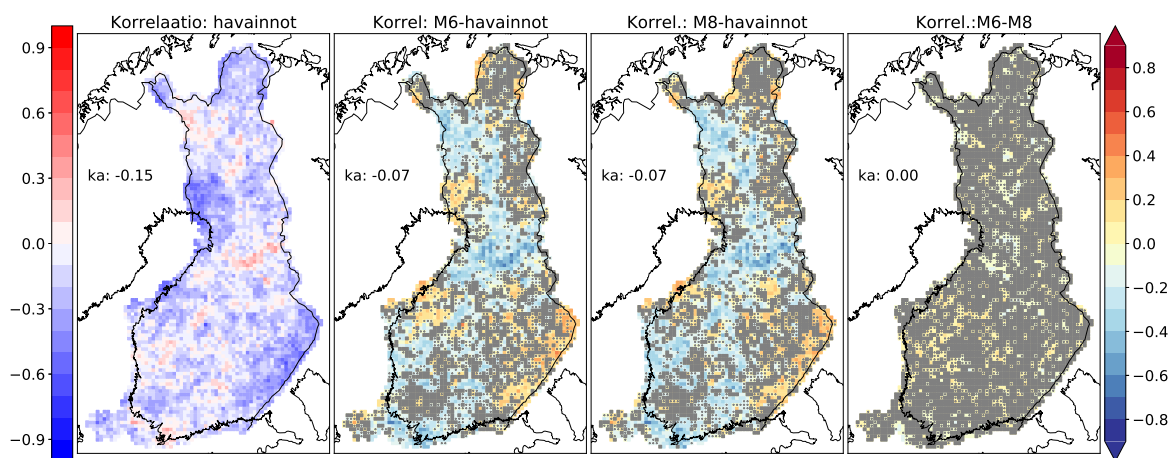
Kuva 8.3: Kolmen viikon sateisten jaksojen vuosittaisten määrien korrelaatiot rastilla merkityn pisteen suhteen vertailukaudella. Mallien keskiarvokarttoihin on merkitty harmaa piste, jos mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Sadejaksojen vuotuisten määrien alueelliset korrelaatiot kahden pisteen suhteen nähdään kuvassa 8.3. Havaintoaineistossa on heikko negatiivinen korrelaatio osassa Lappia eteläboreaalisen pisteen suhteen (kuva 8.3a) ja lisäksi voimakkaan positiivisen korrelaation alue on melko pieni vertailupisteen ympärillä. Saman pisteen suhteen sekä M6- että M8-menetelmät antavat keskimäärin yli kaksinkertaisen kor-

relaatiokertoimen havaintoaineistoon verrattuna ja negatiivisen korrelaation alueet näyttäisivät häviävän kartalta.

Pohjoisboreaalisen pisteen suhteen havaintoaineistossa (kuva 8.3b) korrelaatio on keskimäärin suurempi kuin eteläboreaalisen pisteen suhteen ja negatiivisen korrelaation alueet ovat pienempiä ja heikompia. Jälleen näyttäisi, että M6- ja M8-menetelmillä korrelaatiokerroin olisi kaikkialla positiivinen keskimääräisen eron harhankorjausmenetelmien ja havaintoaineiston välillä ollessa vähintään 25%. Kaikkien neljän vertailun pisteen suhteen erot harhankorjausmenetelmien välillä ovat mitättömän pienet (ei näytetä).

Kuvasta 8.4 havaitaan, että havaintoaineiston mukaan pitkien sateisten- ja kuivien jaksojen välinen korrelaatio on keskimäärin -0,15 ja lähes koko maassa negatiivinen. Tämä on odotettavaa, sillä vuodelle, jolloin on keskimääräistä enemmän pitkiä sateisia jaksoja, mahtuu mitä luultavimmin keskimääräistä vähemmän pitkiä kuivia jaksoja.



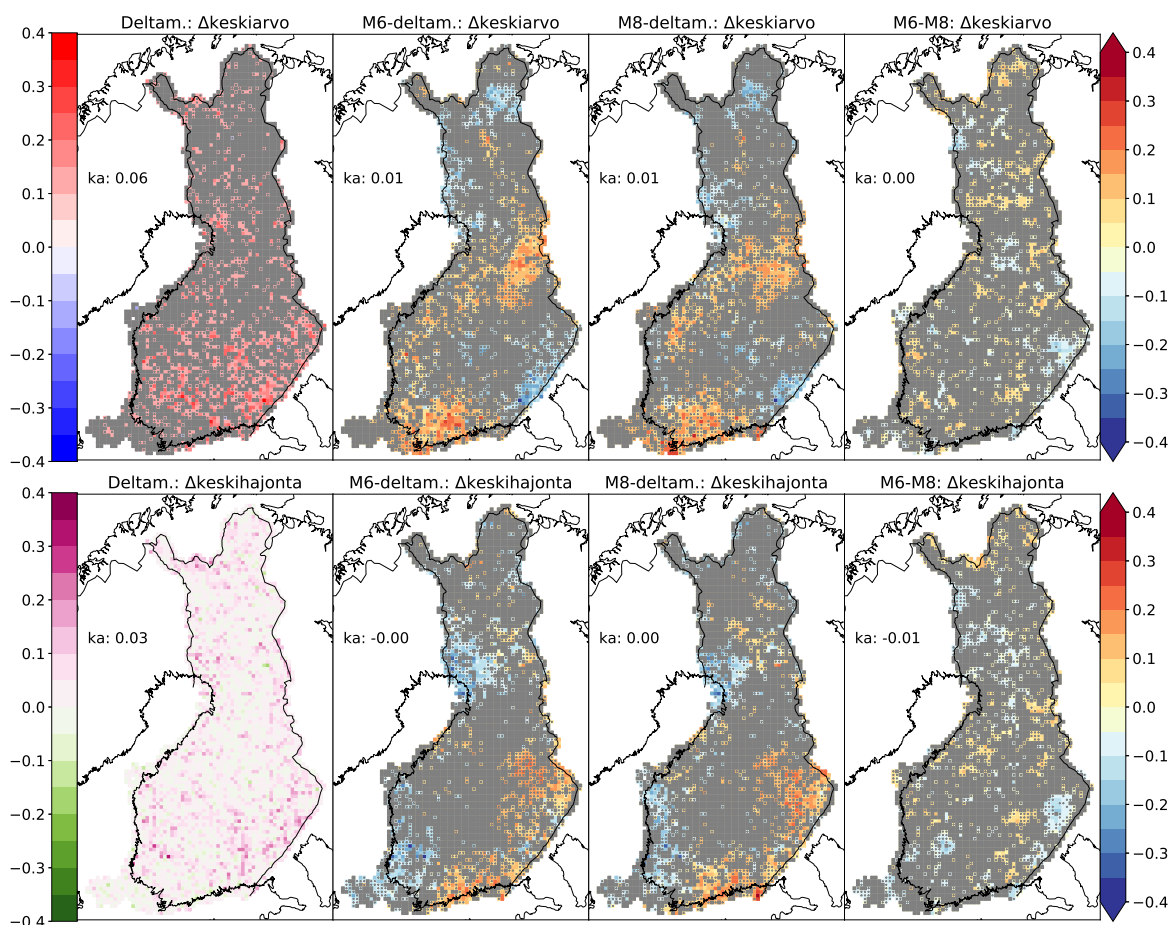
Kuva 8.4: Kolmen viikon sateisten ja kuivien jaksojen lukumäärien välinen korrelaatio vertailukaudella. Mallien eroa havaintoihin kuvaaviin karttoihin on merkitty harmaa piste, jos mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Molempien harhankorjausmenetelmien mukaan korrelaatio on keskimäärin vielä enemmän negatiivinen kuin havaintoaineistossa ja näyttäisi olevan tasaisen negatiivinen koko Suomen alueella. Merkitseviä eroja M6- ja M8-menetelmien välillä ei juurikaan ole.

8.2 Sateisuuden muutokset tulevaisuudessa

8.2.1 Tulevaisuuden mittapuun mukaan sateiset jaksot

Tarkastellaan seuraavaksi sitä, muuttuuko pitkittyneiden suhteellisesti rankan sateen jaksojen määrä tulevaisuudessa. Kuvassa 8.5 deltamenetelmällä havaitaan jaksojen määrän lisääntyvän merkitsevästi ainoastaan pienillä aluella lähinnä Suomen eteläisellä puoliskolla ja vuosien välisen keskihajonnan muutosten olevan pieniä kaikkialla lukuunottamatta muutamia yksittäisiä pisteitä, joissa hajonta kasvaa yli 0,2 jaksoa vuodessa.



Kuva 8.5: Muutokset kolmen sateisen viikon jaksojen vuotuisessa määrässä ja vuosien välisessä keskihajonnassa kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100. Muutosten merkitsevyyttä deltamenetelmällä on tutkittu Wilcoxonin testin avulla (H_0 : ei muutosta; harmaa piste tarkoittaa p-arvoa yli 5% ja kokonaan harmaa ruutu p-arvoa yli 10%). Mallien keskiarvo- ja keskihajontakarttoihin on merkitty harmaat pisteet hilaruutuhin, joissa mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

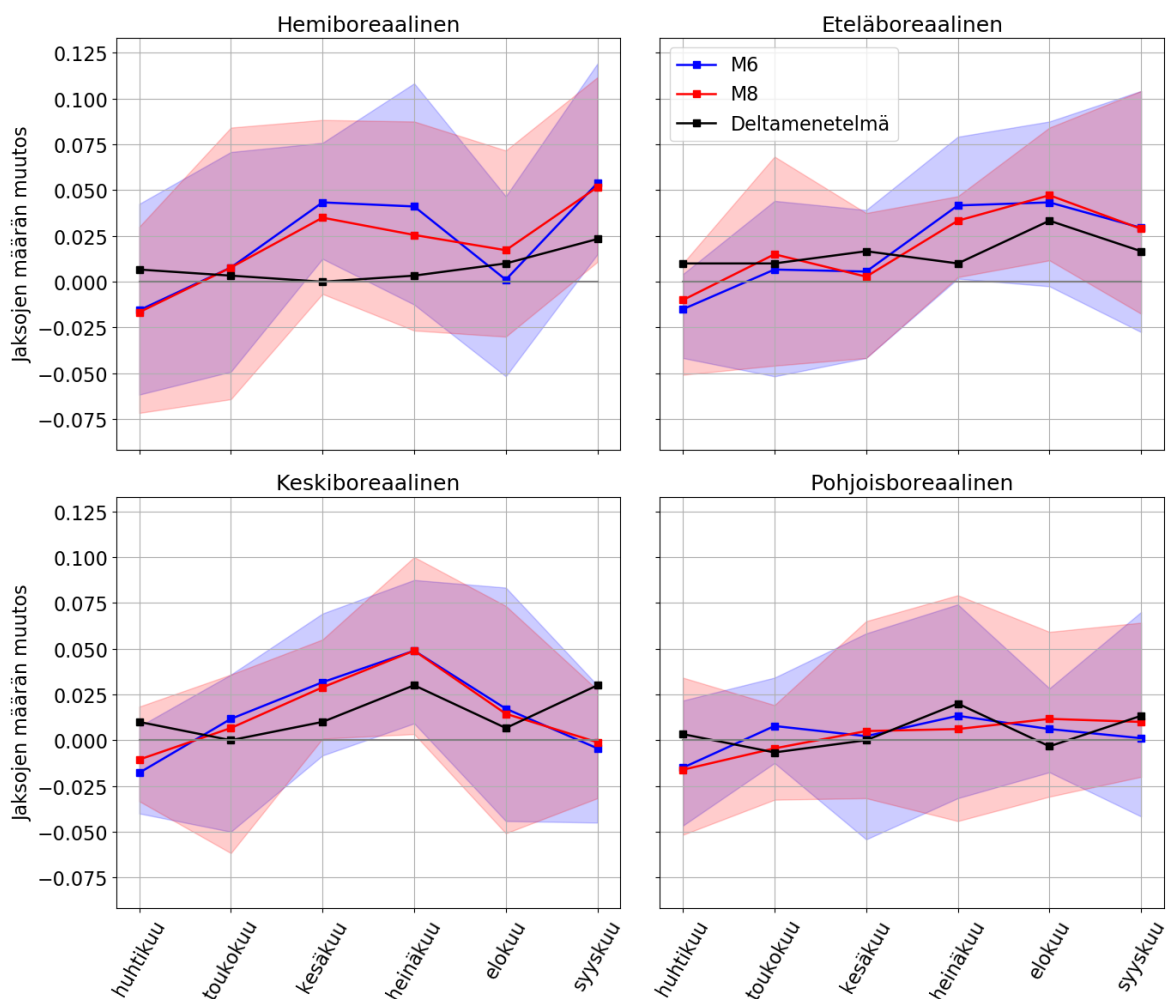
M6-menetelmällä koko maan keskiarvon muutos ei juuri eroa deltamenetelmän muutoksesta mutta alueellisia eroavaisuuksia on jonkin verran. Etelä-Suomessa ja Kainuussa on alueita, joilla muutos on keskimäärin noin 0,2 jaksoa vuodessa ja Kainuussa tämä tarkoittaisi vertailukauteen nähden noin 30% kasvua sateisten jaksoiden määrässä. Maan pohjois- ja kaakkoisosissa on myös alueita, missä muutos on deltamenetelmää negatiivisempi, mikä vie myös absoluuttisen muutoksen negatiiviseksi. Myöskään vuosien välisen hajonnan osalta M6-menetelmän mallikeskiarvon muutos ei koko maan keskiarvona poikkea deltamenetelmän muutoksesta, sillä maan länsirajoilla on alueita, missä muutos on deltamenetelmää negatiivisempi ja lähinnä kaakkoisosissa maata alueita, missä muutos on sitä positiivisempi.

M8-menetelmällä korjattujen mallien keskiarvossa ja vuosien välisessä hajonnassa erot deltamenetelmän muutoksiin ovat samankaltaiset kuin M6-menetelmällä eikä merkitseviä eroja harhankorjausmenetelmien välillä ole lukuunottamatta yksittäisiä pisteitä.

Sadejaksojen määrän keskimääräinen vuoden sisäinen sykli (kuva 8.2) ei pääpiirteissään muutu, koska muutokset ovat keskimäärin pieniä (kuva 8.6). Erityisesti deltamenetelmällä muutokset ovat hyvin pieniä kaikkina kuukausina kaikilla alueilla.

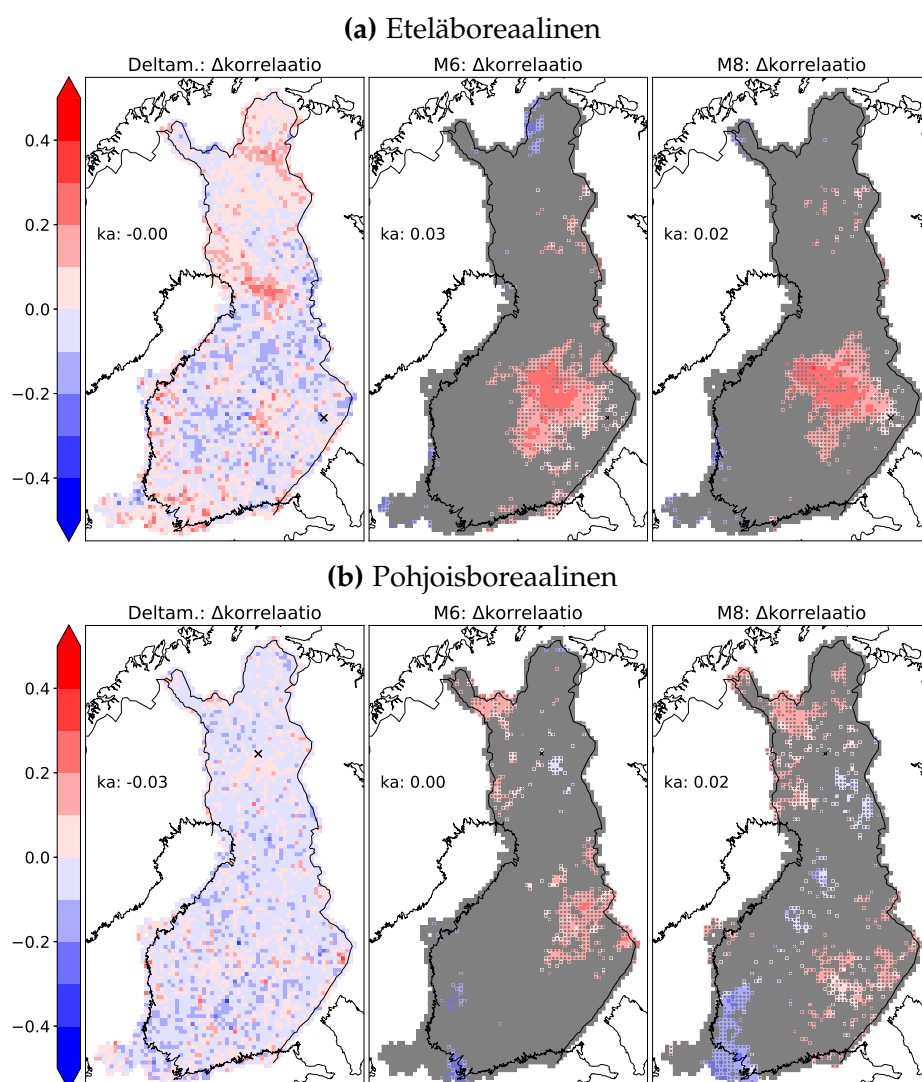
Hemiboreaalissa jaksoiden määrä lisääntyy merkitsevästi M6-menetelmän mukaan kesäkuussa ja molemmilla harhankorjausmenetelmillä syyskuussa. Eteläboreaalissa lisääntyminen on merkitsevää M8-menetelmällä heinä-elokuussa ja M6-menetelmällä heinäkuussa. Keskiporeaalissa puolestaan merkitsevä lisäys tapahtuu M8-menetelmällä kesäkuussa ja M6-menetelmällä heinäkuussa. Pohjoisboreaalissa muutokset ovat pieniä kaikkina kuukausina.

M6- ja M8-menetelmät eivät eroa sateisten jaksoiden kuukausittaisten määrien muutosten suhteen toisistaan merkitsevästi, mutta muutos deltamenetelmällä huhtikuussa eteläboreaalissa on merkitsevästi positiivisempi kuin kummallakaan harhankorjausmenetelmällä. Yleisesti molemmilla harhankorjausmenetelmillä jaksoiden määrän kasvu tapahtuu kesä-syyskuussa ja huhtikuussa mallikeskiarvojen muutokset ovat kaikilla alueilla negatiiviset.



Kuva 8.6: Kolmen viikon sateisten jaksojen kuukausittaisten määrien muutokset kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100. Eri vyöhykkeiden arvot on laskettu kymmenen hilapisteen keskiarvona (kuva 5.1). Jakson päättymispäivä määrää kuukauden, värjätyt alueet kuvaavat mallien välisen jakauman 5- ja 95-prosenttipisteitä ja viivat mallikeskiarvoja.

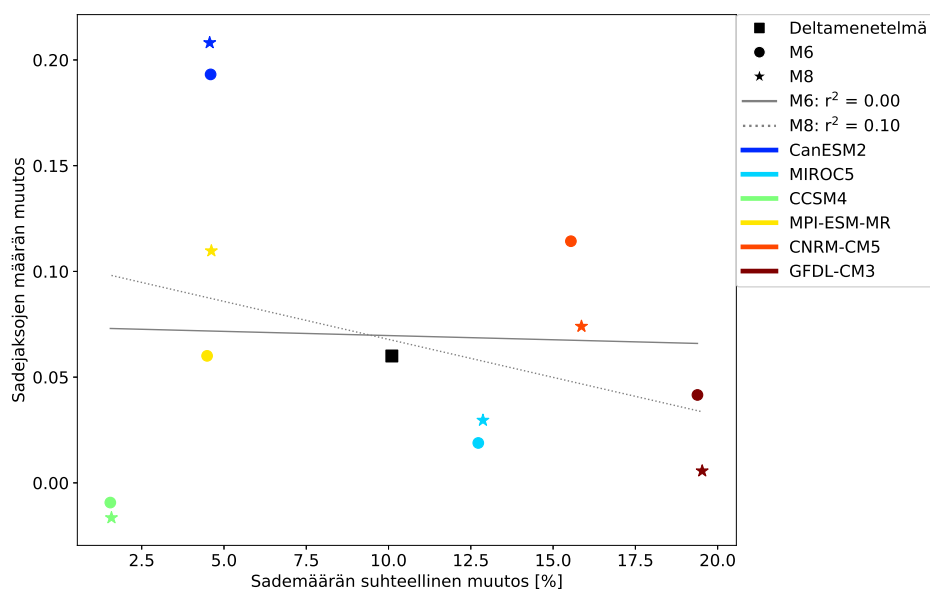
Sadejaksojen määrien aikasarjojen alueelliset korrelaatiokertoimet muuttuvat eri aineistoissa kuvan 8.7 mukaisesti. Deltamenetelmällä havaintoaineiston negatiivisen korrelaation alue Lapissa eteläboreaalisen pisteen suhteen (kuva 8.3) keskimäärin heikkenee hieman kuten toisaalta hieman heikkenee myös voimakamman korrelaation alue eteläisessä Suomessa. M6- ja M8-menetelmillä korrelaation suuruus ei keskimäärin juuri muutu mutta Savossa vertailupisteen länsipuolella löytyy alue, missä korrelaatiokerroin kasvaa yli 0,2 yksikköä.



Kuva 8.7: Kolmen viikon sateisten jaksojen vuosittaisten määrien korrelaatioiden muutokset kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 rastilla merkityn pisteen suhteen. Mallien keskiarvokartoissa on harmaa piste, jos mallien välisten muutosten keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

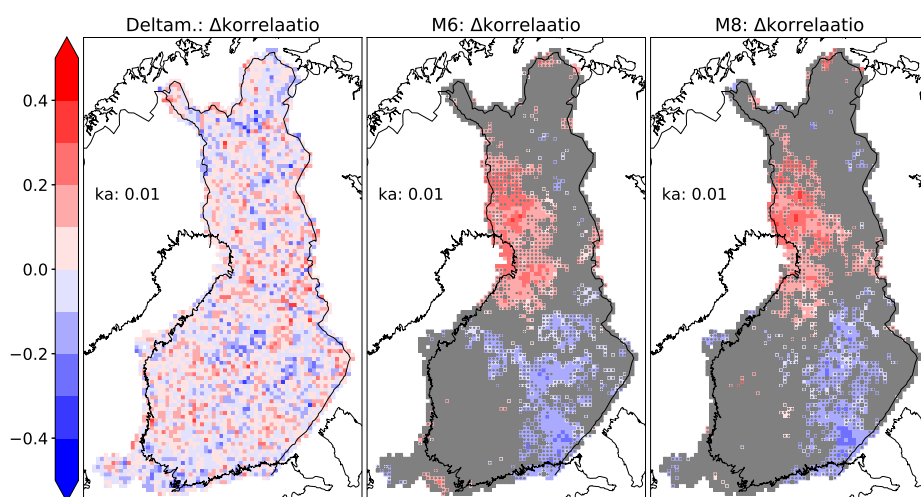
Pohjoisboreaalisen pisteen suhteen lasketuissa korrelaatioissa delta- ja harhankorjausmenetelmillä ei havaita suuria muutoksia missään ja keskimäärin muutos on lähellä nollaa. Hemi- ja keskiboreaalisten pisteiden suhteen lasketut korrelaatiokerrotoimien muutokset ovat pieniä kaikilla alueellistamismenetelmällä (ei näytetä).

Keskimäärin sadejaksojen määrien muutokset ovat siis pieniä eikä merkitsevää korrelaatiota sademäärän muutoksen kanssa havaita kummallakaan harhankorjausmenetelmällä (kuva 8.8). Kaikille ilmastomalleille yhteisiä eroja harhankorjausmenetelmien välillä ei havaita ja suurin sadejaksojen määrän muutos saadaan mallilla, jossa sademäärän kasvu on keskimääräistä pienempää (CanESM2).



Kuva 8.8: Kolmen viikon sadejaksojen määrien muutokset huhti-syyskuussa kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 sademäärien suhteellisten muutosten funktiona eri malleilla ja harhankorjausmenetelmillä. Tarkastelu on suoritettu koko Suomen keskiarvoille ja suorien sovitukset on tehty pienemmän neliösumman menetelmällä. Suure r^2 kuvaa, kuinka hyvin sademäärän muutos selittää jaksojen määrän muutosta.

Pitkien sateisten ja kuivien jaksojen välinen korrelaatio pysyy kuvan 8.9 mukaisesti deltamenetelmällä keskimäärin ennallaan ja alueellinen vaihtelu on suurta. Korrelaatiokerroin ei keskimäärin juuri muutu vertailukaudesta myöskään kummallakaan harhankorjausmenetelmällä mutta selvempiä positiivisen ja negatiivisen muutoksen alueita on havaittavissa.



Kuva 8.9: Kolmen viikon sateisten ja kuivien jaksojen välisen korrelaation muutos kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100. Mallien keskimääräistä muutosta kuvaaviin karttoihin on merkitty harmaa piste, jos mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

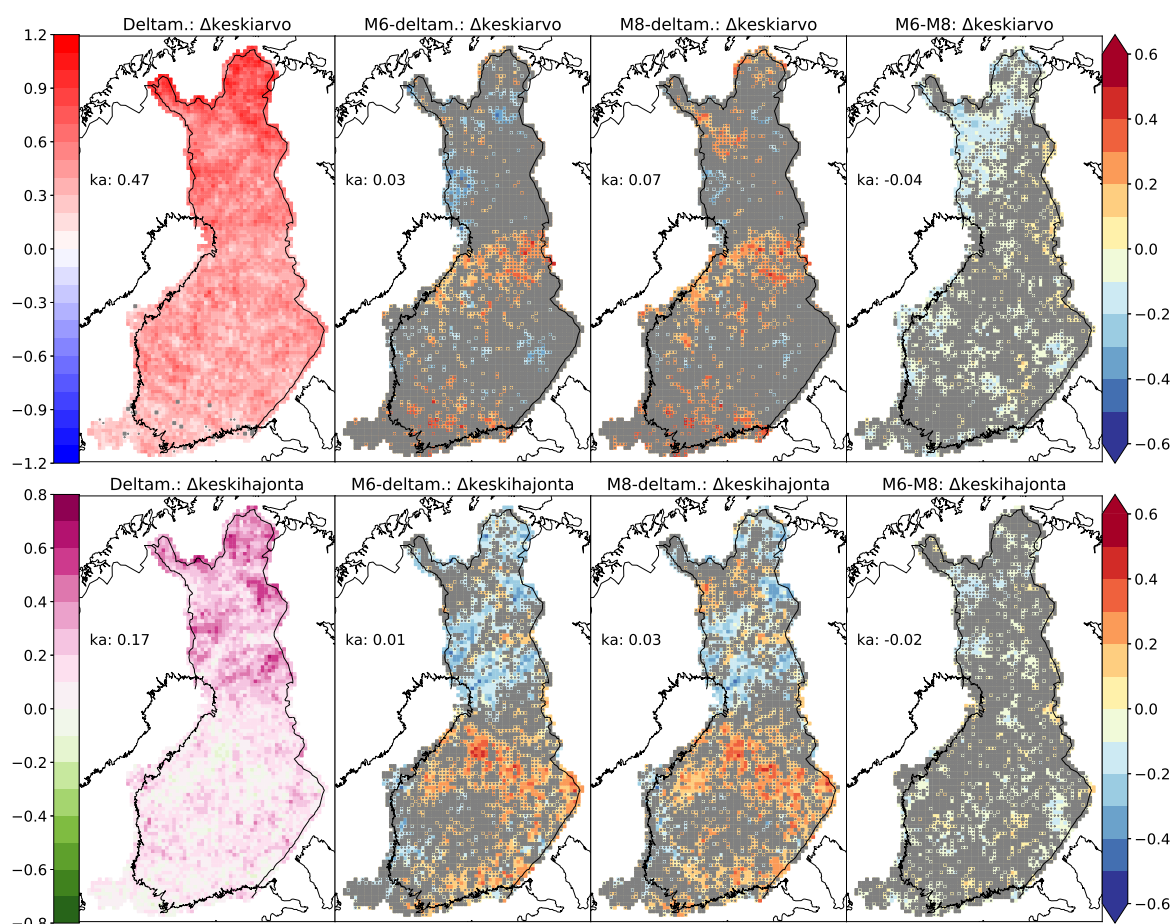
M6-menetelmällä korrelaatiokerroin hieman kasvaa Lapin lounaisosassa ja Perämeren rannikolla mutta pienenee hieman osassa maan kaakkois- ja keskiosia. M8-menetelmällä muutokset ovat edellisen kaltaisia.

8.2.2 Vertailukauden mittapuun mukaan sateiset jaksot

Kaikkien alueellistamismenetelmien mukaan vertailukauden ilmastoon verrattuna sadejaksojen määrä lisääntyy tilastollisesti merkitsevästi käytännössä koko maassa (kuva 8.10). Deltamenetelmällä tämä johtuu siitä, että sadepäivien lukumäärä pysyy samana, joten vertailukauden klimatologinen kuukausisademäärä ylittyy useammin, koska sademäärä keskimäärin kasvaa ilmastomallien mukaan (kuva 6.3). Koko maan keskiarvona lisäyksen suuruus on noin 64% ja jaksojen määrä näyttäisi lisääntyvän eniten siellä, missä sademäärä kasvaa eniten (kuva 6.3), ja jaksoja oli vertailukaudella vain vähän (kuva 8.1). Näillä alueilla Lapissa jaksojen määrä jopa kaksin- tai kolminkertaistuu. Keskihajonnan kasvu on deltamenetelmän mukaan keskimäärin noin 21% ollen lähes koko maassa positiivinen.

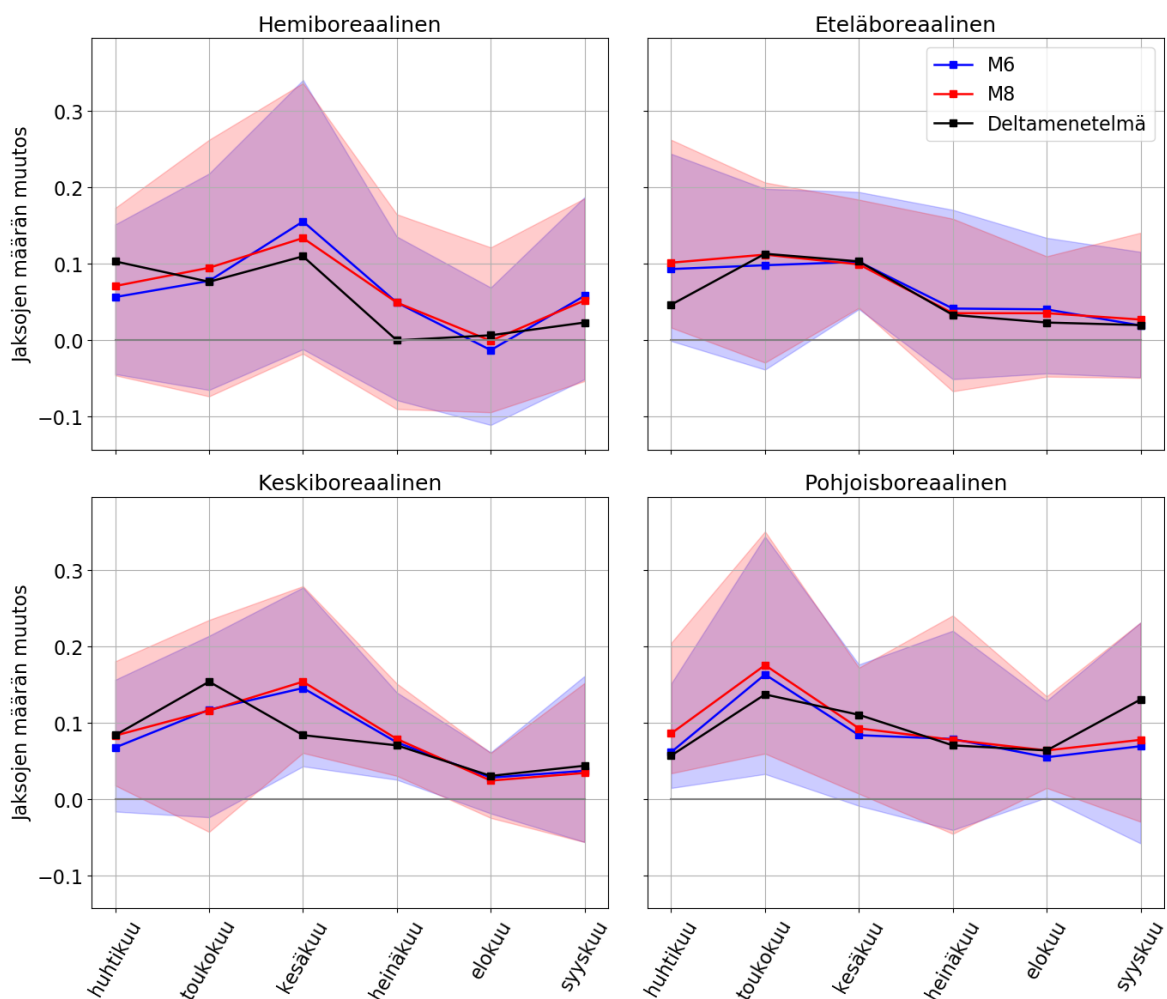
M6-menetelmällä koko maan sadejaksojen määrän ennustetaan muuttuvan hieman enemmän kuin deltamenetelmällä ja M8-menetelmän ennustama muutos on noin 15% suurempi kuin deltamenetelmän keskimääräinen muutos. Molemmilla harhankorjausmenetelmillä muutokset jakautuvat alueellisesti deltamenetelmää tasaisemmin.

Vuosien välisen hajonnan kasvu on M6-menetelmällä samaa luokkaa deltamenetelmän kanssa mutta M8-menetelmällä muutos on noin 18% suurempi. Myös keskihajonnan muutokset ovat alueellisesti deltamenetelmää tasaisemmin jakautuneet molemmilla harhankorjausmenetelmillä ja M8-menetelmän muutokset ovat lähes koko maassa tasaisesti hieman suurempia kuin muutokset M6-menetelmän mukaan.



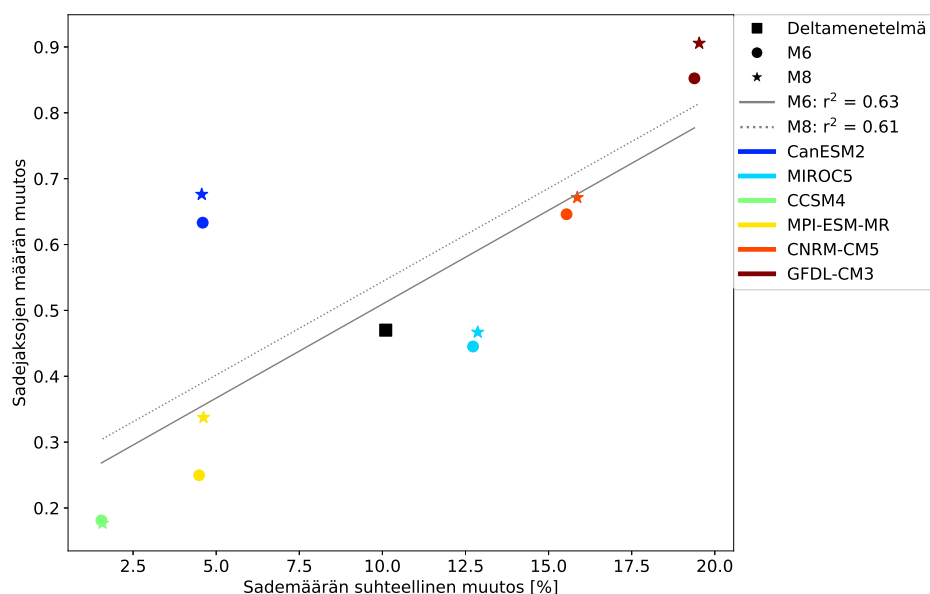
Kuva 8.10: Muutokset kolmen sateisen viikon jaksojen vuotuisessa määrässä ja vuosien väliseessä keskihajonnassa kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 (vertailukauden keski-sademäärään perustuva sateisten jaksoiden määrittely). Muutosten merkitsevyyttä deltamenetelmällä on tutkittu Wilcoxonin testin avulla (H_0 : ei muutosta; harmaa piste tarkoittaa p-arvoa yli 5% ja kokonaan harmaa ruutu p-arvoa yli 10%). Mallien keskiarvo- ja keskihajontakarttoihin on merkitty harmaat pisteet hilaruutuhin, joissa mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Kuvasta 8.11 havaitaan, että deltamenetelmällä kuukausitasolla suurin lisääntyminen pitkien sadejaksojen määrässä ajoittuu touko- tai kesäkuussa päättyviin jaksoihin ja loppukesällä jaksoiden määrä lisääntyy puolestaan vähemmän. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että ilmastomallien mukaan sademäärät kasvavat Suomessa keskimäärin enemmän juuri huhti-kesäkuussa kuin heinä-syyskuussa (Ruosteenoja et al., 2016). Toisin kuin vertailukaudella (kuva 8.2), mallikeskiarvojen muutokset molemmilla harhankorjausmenetelmillä vastaavat melko hyvin deltamenetelmän muutoksia, vaikkakin toki vielä paremmin toisiaan.



Kuva 8.11: Kolmen viikon sateisten jaksojen kuukausittaisten määrien muutokset kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100. Eri vyöhykkeiden arvot on laskettu kymmenen hilapisteen keskiarvona (kuva 5.1). Jakson päättymispäivä määrää kuukauden, värjätty alueet kuvaavat mallien välisen jakauman 5- ja 95-prosenttipisteitä ja viivat mallikeskiarvoja.

Sademäärän kasvu selittää kuvan 8.12 mukaan melko hyvin sadejaksojen määrän lisääntymisen keskimäärin. Yhtä mallia (CCSM4) lukuunottamatta M8-menetelmällä sadejaksojen määrä kasvaa enemmän kuin M6-menetelmällä. Lisäksi yhdellä mallilla (CanESM2), jossa sademäärä kasvaa varsin maltillisesti, sadejaksojen määrä kasvaa keskimääräistä enemmän. Sama malli poikkeaa eniten muista myös kauden 2071-2100 klimatologiseen sademäärään perustuvien sadejaksojen määrittelyn osalta (kuva 8.8).



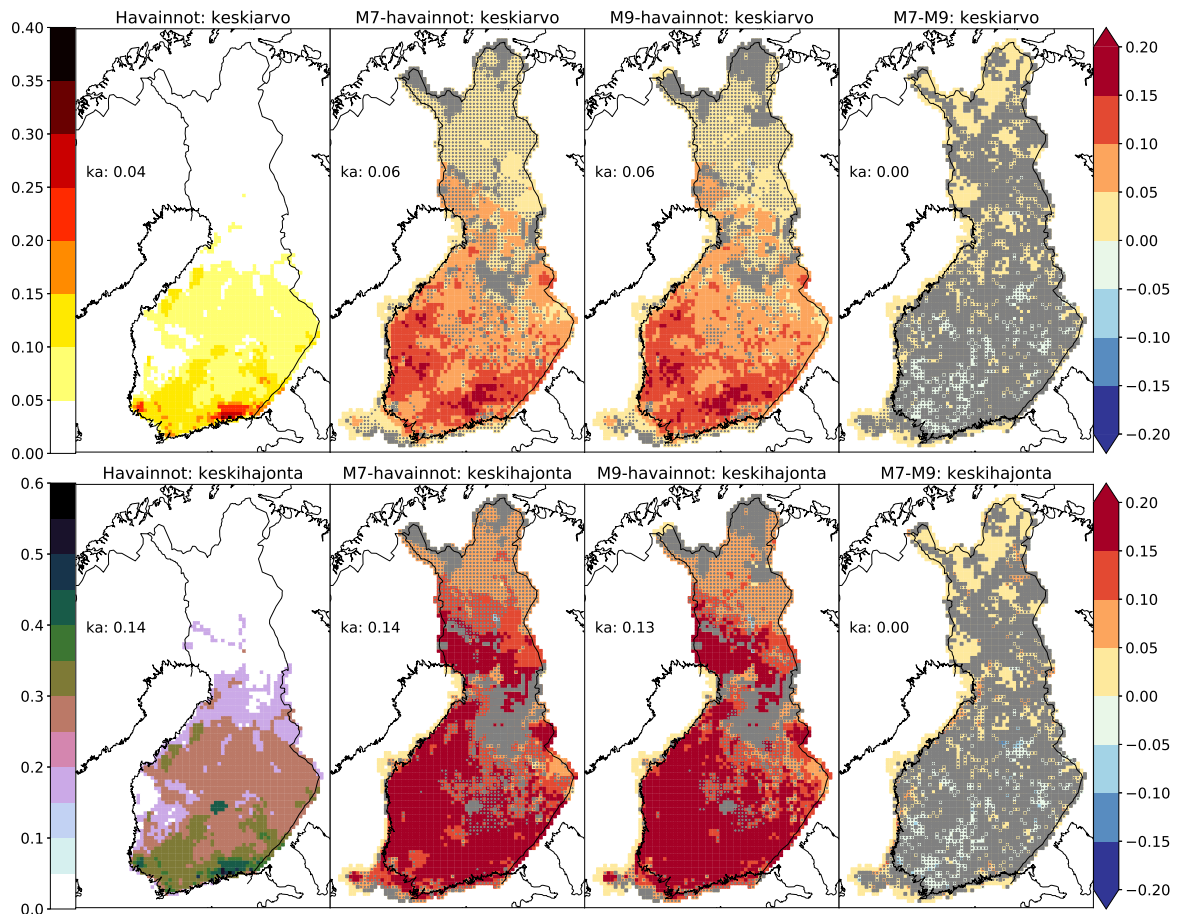
Kuva 8.12: Kolmen viikon sadejaksojen määrien muutokset huhti-syyskuussa kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 keskisademäärien suhteellisten muutosten funktiona eri malleilla ja harhankorjausmenetelmillä. Tarkastelu on suoritettu koko Suomen keskiarvoille ja suorien sovituksia on tehty pienemmän neliösumman menetelmällä. Suure r^2 kuvaa, kuinka hyvin sademäärän muutos selittää jaksojen määrän muutosta.

9 Kahden viikon hellejaksot

9.1 Helteet kaudella 1981-2010

Kahden viikon hellejaksoja on ollut havaintojen mukaan (kuva 9.1) vertailukaudella erittäin vähän. Alle puolen Suomen alueella hellejakso on toistunut vähintään kerran 20 vuodessa. Alueelliset erot ovat kuitenkin erittäin suuria ja etelärannikkolla paikallisesti hellejakso on toistunut joka neljäs vuosi.

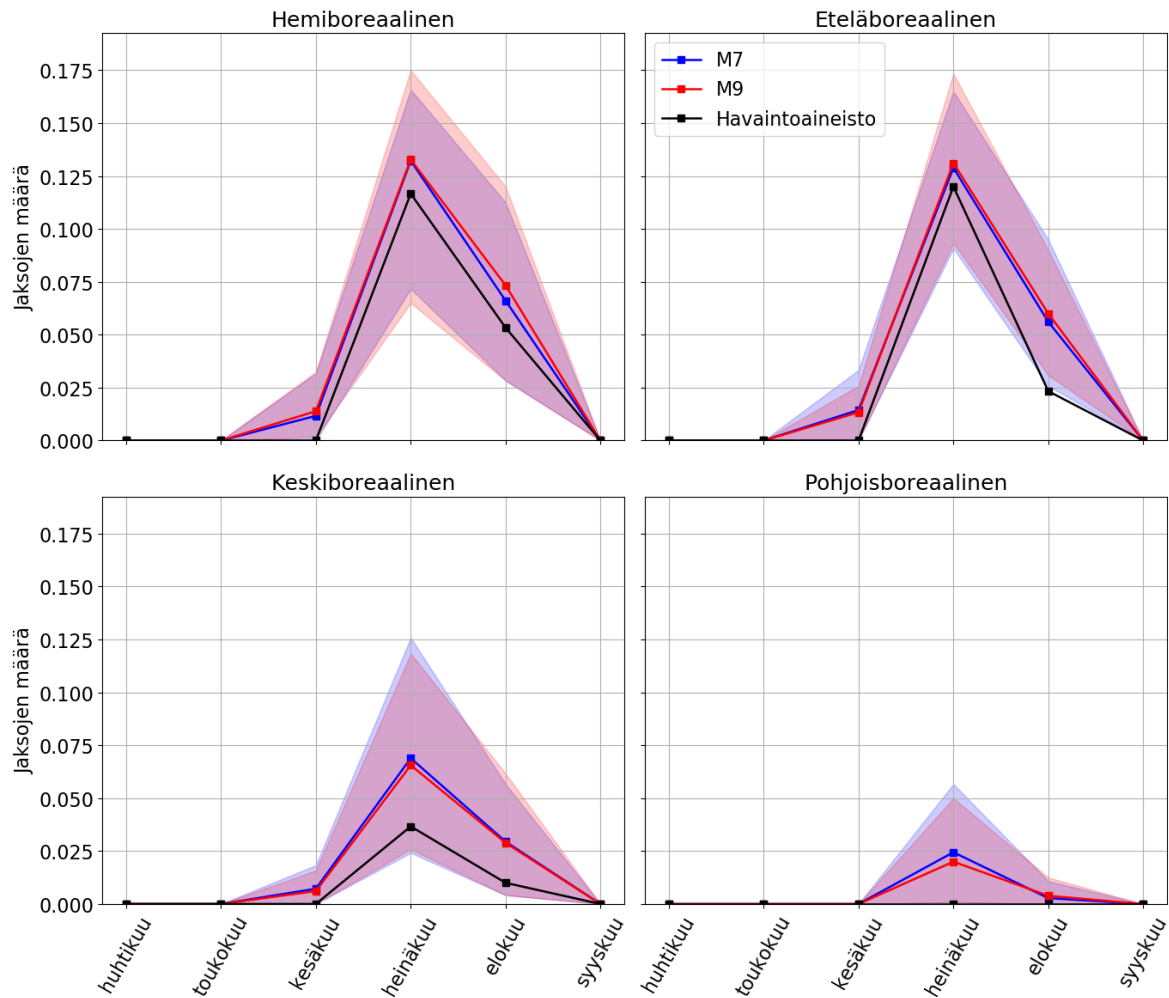
Molemmat harhankorjausmenetelmät yliarvioivat jaksojen määrän reilusti lähes koko maassa ja keskimäärin jaksojen määrä ylittää havaintoaineiston 150%:lla. Erot havaintoaineistoon ovat molemmilla menetelmillä hyvin samankaltaiset ja suuret yliarviot tapahtuvat eteläisen ja läntisen Suomen alueella. Pohjoisen Suomen alueella ei voida sanoa mallien olevan yhtä mieltä siitä, että jaksojen määrä eroaisi nollasta. Yksittäisten hellepäivien määrä vuodessa keskimäärin on lähes sama sekä havaintoaineistossa että harhankorjausmenetelmillä (ei näytetä), mikä viittaa siihen, että ilmastomalleissa pitkät lämpimät jaksot todella ovat liian pitkiä.



Kuva 9.1: Kahden viikon hellejaksojen määrä vuodessa vertailukaudella. Keskihajonnat kuvaavat vuosien välistä hajontaa. Mallien keskiarvo- ja keskihajontakarttoihin on merkitty harmaat pisteet hilaruutuhin, joissa mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Havaitut vuosien väliset keskihajonnat ovat keskimäärin kolminkertaiset keskiarvoon nähden, mikä johtuu siitä, että tapahtumat ovat harvinaisia. Molemmilla harhankorjausmenetelmillä hajonnat ovat keskimäärin noin kaksinkertaiset havaintoaineistoon verrattuna ja erot ovat suuria kaikkialla paitsi Keski- ja Pohjois-Lapissa sekä osissa Kainuuta ja Pohjois-Savoa. Selviä eroja M7- ja M9-menetelmien välillä ei ole keskiarvoissa eikä vuosien välisissä hajonnoissa lukuunottamatta osaa Lappia, missä M7-menetelmä antaa hieman suurempia arvoja.

Hellejaksojen keskimääräinen kuukausittainen määrä ilmastovyöhykkeittäin on kuvan 9.2 mukainen. Havaintoaineistossa pohjoisboreaalissa ei ole havaittu hellejaksoja lainkaan mutta muilla vyöhykkeillä jaksoja on esiintynyt eniten heinäkuussa päättyvillä jaksoilla ja jonkin verran myös elokuussa päättyvillä jaksoilla.

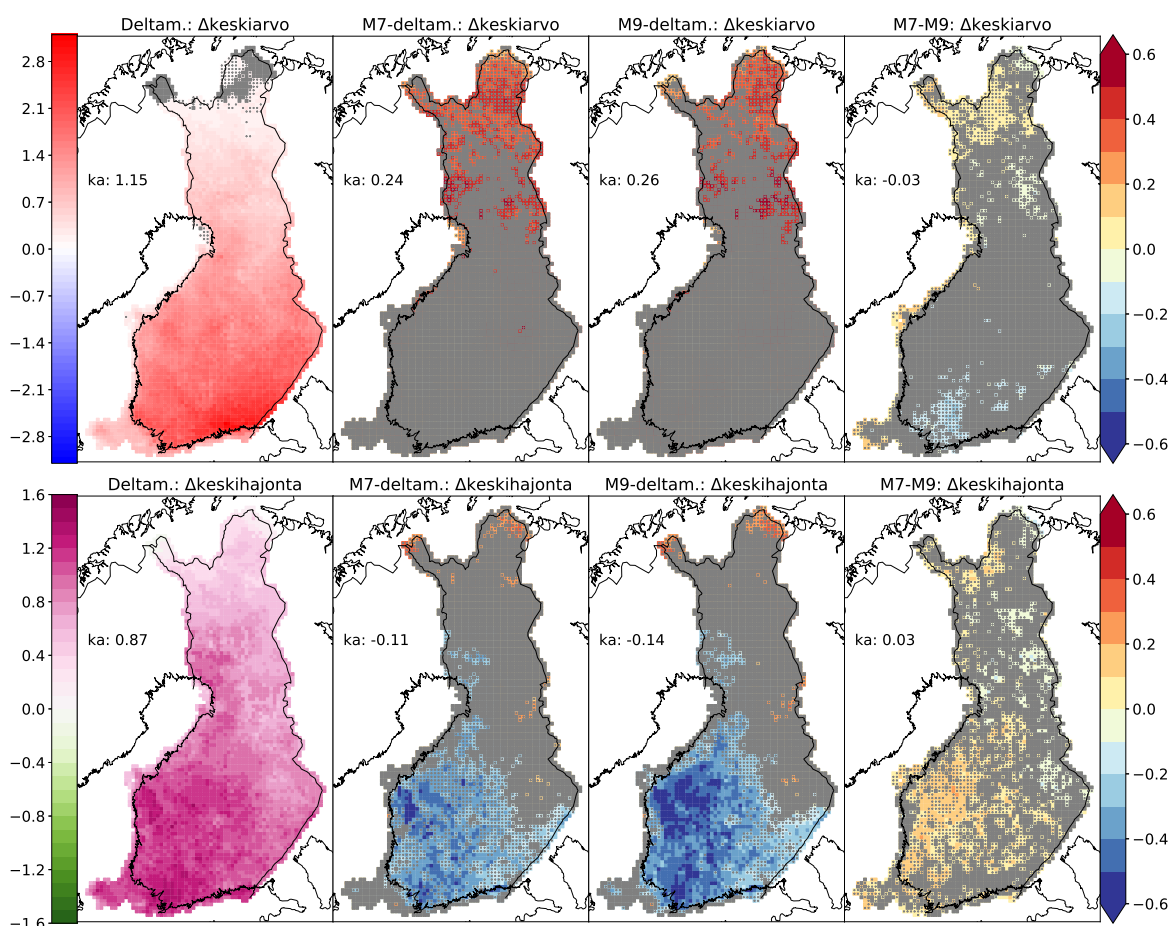


Kuva 9.2: Kahden viikon hellejaksojen määrä kuukausittain vertailukaudella. Eri vyöhykkeiden arvot on laskettu kymmenen hilapisteen keskiarvona (kuva 5.1). Jakson päättymispäivä määrää kuukauden, värjätyt alueet kuvaavat mallien välisen jakauman 5- ja 95-prosenttipisteitä ja viivat mallikeskiarvoja.

Molemmilla harhankorjausmenetelmillä mallikeskiarvojen mukaan hellejaksoja esiintyisi myös kesäkuussa kaikilla paitsi pohjoisboreaalisella vyöhykkeellä ja tätä lukuunottamatta vuoden sisäinen sykli toteutuukin kohtuullisesti. Harhankorjausmenetelmät kuitenkin yliarvioivat jaksojen määrän kaikkina kesäkuukausina eikä selkeitä eroja M7- ja M9-menetelmien välillä ole. Ainoastaan eteläboreaalissa elokuussa molemmat harhankorjausmenetelmät yliarvioivat jaksojen määrän merkittävästi.

9.2 Helteisyyden muutokset tulevaisuudessa

Käytetyssä RCP8.5-skenaariossa huhti-syyskuun keskilämpötila nousee niin paljon (kuva 6.2), että deltamenetelmällä hellejaksojen toistuvuus nousee keskimäärin yhdestä jaksosta 25 vuodessa (kuva 9.1) yli yhteen jaksoon vuodessa (kuva 9.3). Hellejaksojen lisääntyminen on absoluuttisesti suurinta maan eteläosassa, missä ne lisääntyvät jopa kahdella jaksolla vuodessa. Muutosten suuruus pienenee melko tasaisesti kohti pohjoista siirryttäessä, mutta kasvu on kuitenkin merkitsevää kaikkialla paitsi Lapin pohjoisosissa.



Kuva 9.3: Muutokset kahden viikon hellejaksojen vuotuisessa määrässä ja vuosien välisessä keskihajonnassa kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100. Muutosten merkitsevyyttä deltamenetelmällä on tutkittu Wilcoxonin testin avulla (H_0 : ei muutosta; harmaa piste tarkoittaa p-arvoa yli 5% ja kokonaan harmaa ruutu p-arvoa yli 10%). Mallien keskiarvo- ja keskihajontakarttoihin on merkitty harmaat pisteet hilaruutuhin, joissa mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

M7-menetelmällä jaksojen määrää lisääntyy keskimäärin noin 20% enemmän kuin deltamenetelmällä ja merkitsevimmät erot deltamenetelmään tulevat Lapin alueelta.

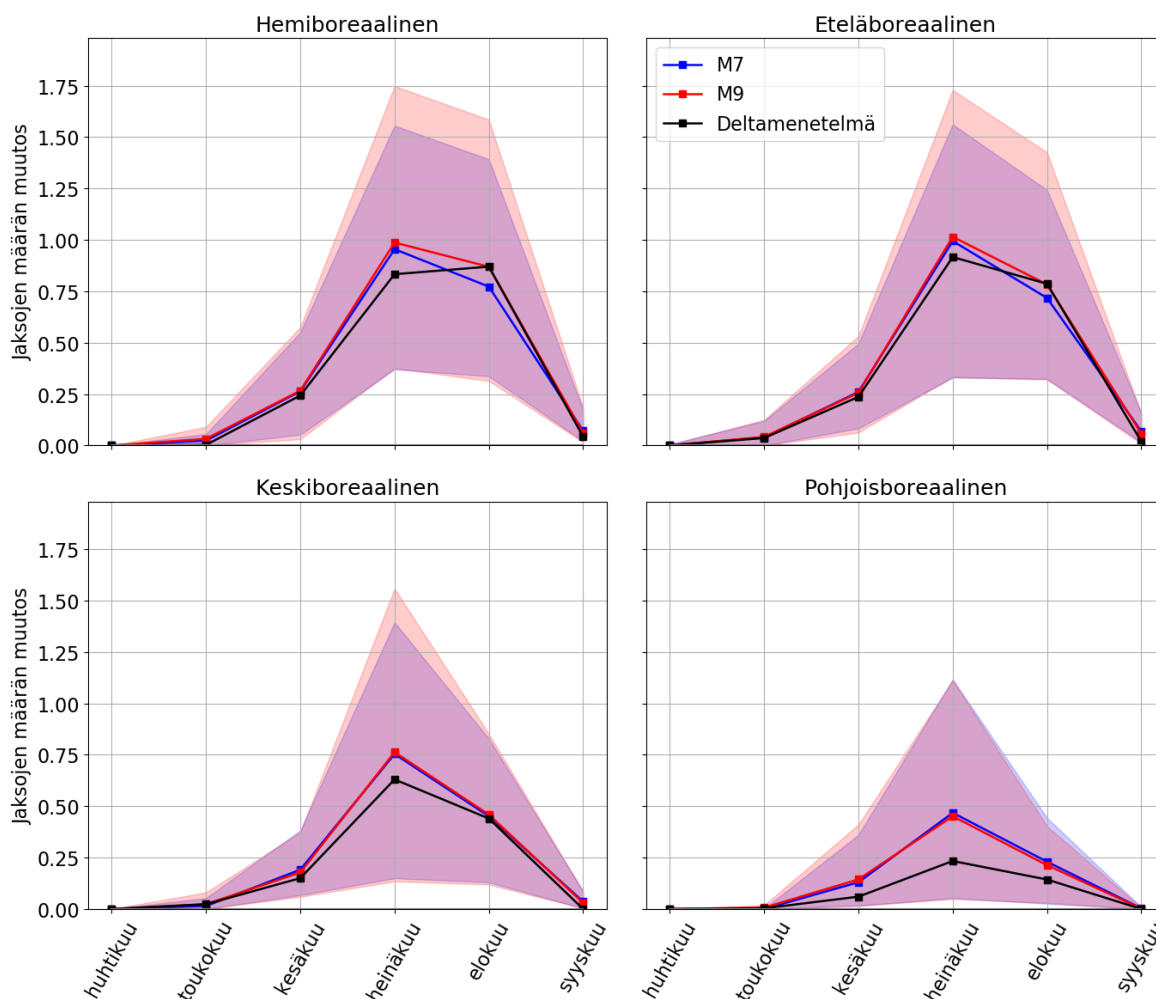
M9-menetelmällä puolestaan lisäys on keskimäärin noin 23% deltamenetelmää suurempaa ja merkitsevimmät erot ovat samoilla alueilla kuin M7-menetelmällä. Suurimmat erot M7- ja M9-menetelmien välillä löytyvät eteläisestä Suomesta, missä M9-menetelmän mukaan jaksojen määrä kasvaisi jopa 0,2 jaksoa vuodessa enemmän kuin M7-menetelmällä. Tosin mallien välinen hajonta on suurta eivätkä erot ole siten merkitseviä.

Deltamenetelmällä vuosien välinen hajonta keskimäärin kuusinkertaistuu vertailukauteen nähden kasvaen koko maassa. Hajonta kasvaa enemmän linjan Oulu-Lappeenranta länsipuolella kuin itäpuolella, mikä on hieman yllättävää, sillä jaksojen määrän muutosten jakaumassa ei tätä havaita.

Sekä M7- että M9-menetelmillä keskihajonnan muutokset ovat deltamenetelmää yli 10% pienempiä ja merkitsevimmät erot löytyvät juuri Oulu-Lappeenranta-linjan länsipuolelta, missä harhankorjausmenetelmillä keskihajonnan muutokset on jopa yli 0,6 jaksoa vuodessa pienempiä. Merkitsevimmät erot M7- ja M9-menetelmien välillä löytyvät Pohjanmaan, Pirkanmaan ja Keski-Suomen alueilta, missä M7-menetelmällä hajonnan muutokset ovat hieman positiivisemmat kuin M9-menetelmällä.

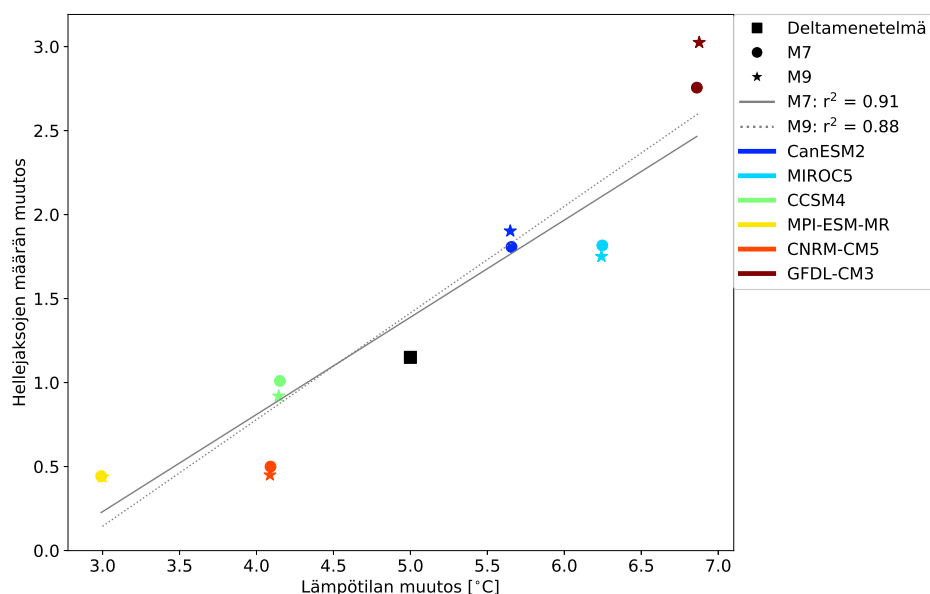
Kuvan 9.4 mukaisesti hellejaksot lisääntyvät eniten heinä- ja elokuussa päättyvillä jaksoilla kaikilla alueilla sekä delta- että molemmilla harhankorjausmenetelmillä. Deltamenetelmän tulosten mukaan muilla paitsi pohjoisboreaalissa alueella hellejaksoja esiintyisi myös touko-, kesä- ja syyskuussa päättyvillä jaksoilla, mitä vertailukaudella ei havaita, ja pohjoisboreaalissakin hellejaksoja esiintyisi kesäkuukausina päättyvinä jaksoina.

Selkein ero delta- ja harhankorjausmenetelmien välillä on pohjoisboreaalissa, missä jaksojen määrän lisäys on M7- ja M9-menetelmillä lähes kaksinkertainen deltamenetelmään nähden. Mallien välinen hajonta on kaikenkaikkiaan suurta ja M9-menetelmällä M7-menetelmää suurempaa erityisesti heinä-elokuussa päättyvillä jaksoilla hemi- ja eteläboreaalissa.



Kuva 9.4: Kahden viikon lämpimien jaksojen kuukausittaisten määrien muutokset kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100. Eri vyöhykkeiden arvot on laskettu kymmenen hilapisteen keskiarvona (kuva 5.1). Jakson päättymispäivä määrää kuukauden, värjätyt alueet kuvaavat mallien välisen jakauman 5- ja 95-prosenttipisteitä ja viivat mallikeskiarvoja.

Keskilämpötilan nousu selittää suurelta osin hellejaksojen määrän kasvua (kuva 9.5) ja suhde näyttää olevan epälineaarinen, mikä selittää osaltaan harhankorjausmenetelmien erot deltamenetelmään keskimääräisissä hellejaksojen määrien muutoksissa. Kulmakerroin ja epälineaarisuus näyttävät olevan hieman voimakkaampia M9-menetelmällä kuin M7-menetelmällä ja näin ollen lineaarinen riippuvuus lämpötilan ja hellejaksojen määrien muutoksilla on hieman voimakkaampi M7-menetelmällä. Lämpötilan muutosten suuruuteen harhankorjausmenetelmällä ei käytännössä ole vaikutusta.

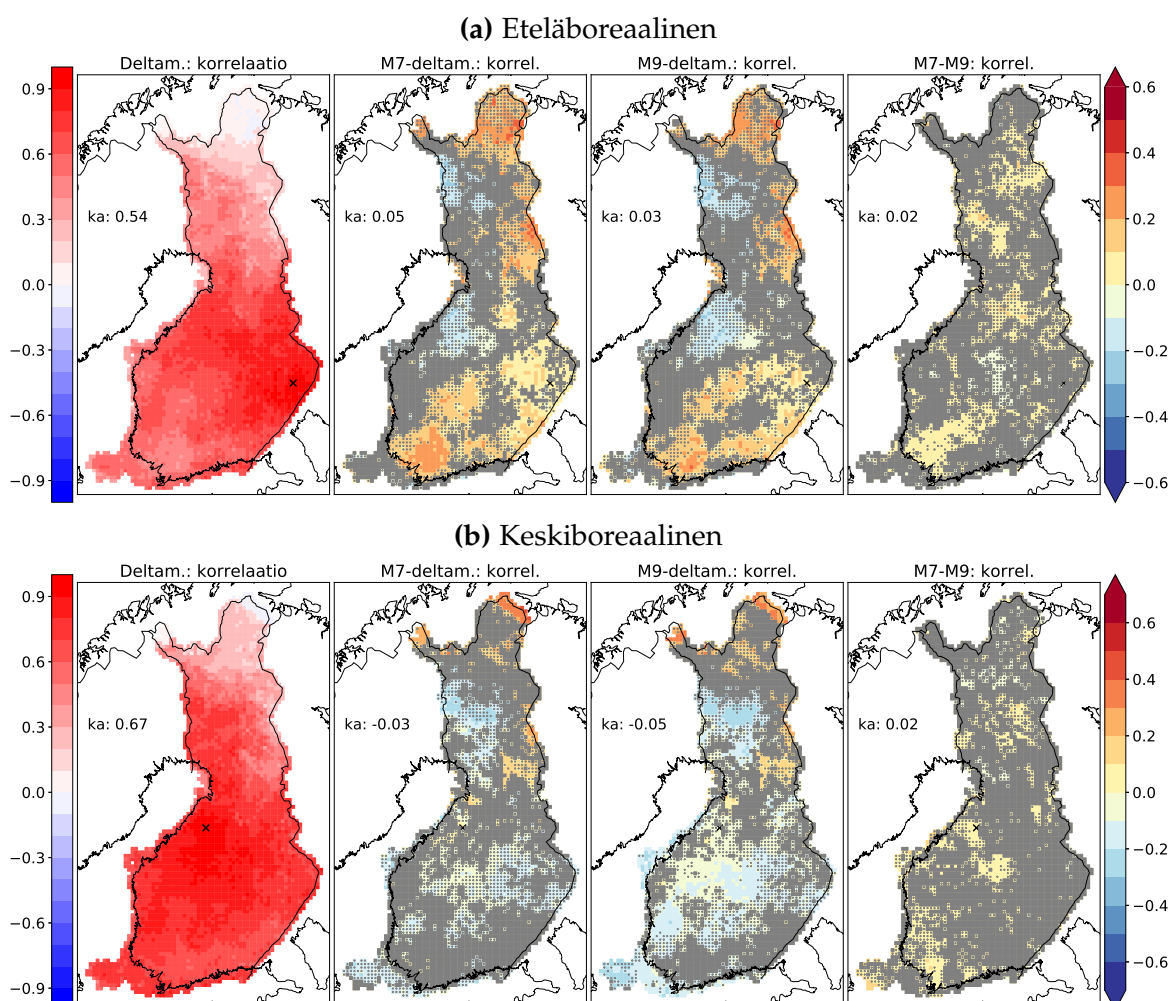


Kuva 9.5: Kahden viikon hellejaksojen määrien muutokset huhti-syyskuussa kaudesta 1981-2010 kauteen 2071-2100 lämpötilojen muutosten funktiona eri malleilla ja harhankorjausmenetelmillä. Tarkastelu on suoritettu koko Suomen keskiarvoille ja suorien sovitukset on tehty pienemmän neliösumman menetelmällä. Suure r^2 kuvaa, kuinka hyvin lämpötilan muutos selittää jaksojen määrän muutosta.

9.3 Korrelaatiot kaudella 2071-2100

Hellejaksojen vähäisen määrän vuoksi vertailukaudella on mielekkäämpää tutkia korrelaatiota ainoastaan tulevaisuuden jaksolla. Kuvan 9.6 mukaisesti deltamenelmällä etelä- ja keskiboreaalisten pisteiden suhteen laskettuna hellejaksojen vuotuisten määrien alueelliset autokorrelaatiot ovat keskimäärin 0,54 ja 0,67. Hemi- ja pohjoisboreaalisten pisteiden suhteen keskiarvot ovat vastaavasti 0,53 ja 0,54 (ei näytetä). Tämä tarkoittaa, että hellejaksot ajoittuvat tyypillisesti tiettyihin vuosiin koko maassa. Korrelaatio on vahva suuressa osassa maata kaikkien paitsi pohjoisboreaalisen pisteen suhteen (ei näytetä).

Eteläboreaalisen pisteen suhteen lasketut korrelaatiot eivät juurikaan keskimäärin eroa delta- ja harhankorjausmenetelmien välillä. Kuvan 9.6 mukaisesti positiivisia eroja löytyy maan etelä- ja pohjoisosista sekä itärajan tuntumasta ja negatiivisia eroja lähinnä länsirannikolta ja Länsi-Lapista. Alueellisesti korrelaatiot harhankorjausmenetelmille ovat siis hieman deltamenetelmää tasaisempia.



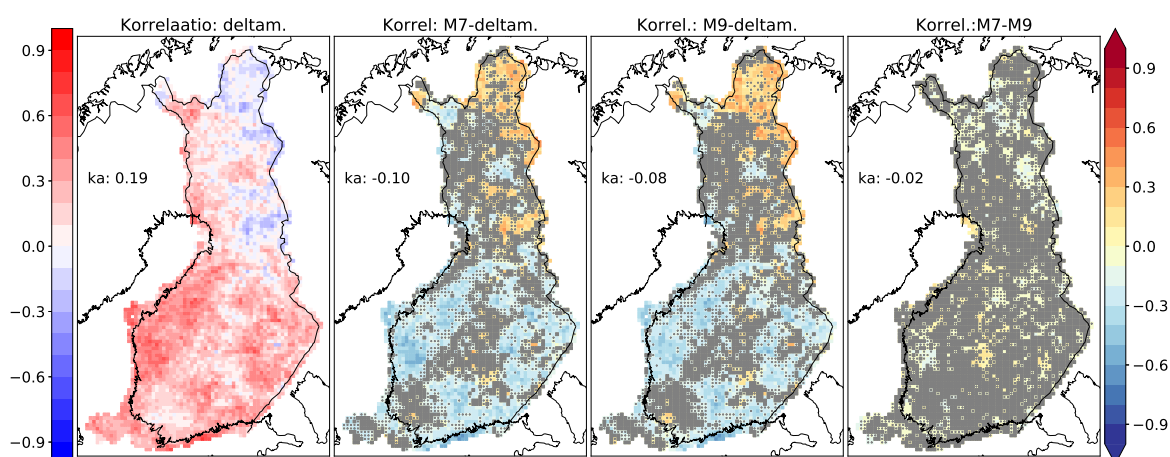
Kuva 9.6: Kahden viikon hellejaksojen vuosittaisten määrien korrelaatiot rastilla merkityn pisteen suhteen kaudella 2071-2100. Mallien keskiarvokarttoihin on merkitty harmaa piste, jos mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Deltamenetelmällä korrelaatio on vahva suurilla alueilla keskiporeaalisien pisteen suhteen ja keskimäärin erot molempiin harhankorjausmenetelmiin ovat pienet. Sekä M7- että M9-menetelmillä korrelaatiot ovat alueellisesti tasaisemmin jakautuneet ja merkitsevimmät negatiiviset erot deltamenetelmään löytyvät Ahvenanmaalta ja Lapin keskiosista, kun taas positiiviset erot Pohjois-Lapista. Selkeitä alueellisia eroja harhankorjausmenetelmien välillä ei havaita.

Kolmen viikon kuivien jaksojen ja kahden viikon hellejaksojen välinen korrelaatio on esitetty kuvassa 9.7. Periaatteessa positiivinen korrelaatio olisi odotettua, sillä ke-säaikaan pitkäkestoinen korkeapaine Suomen yllä voisi aiheuttaa sekä lämmintä että kuivaa säätä. Deltamenetelmällä korrelaatio on keskimäärin heikosti positiivinen ja

positiivisimmat alueet löytyvät länsirannikolta ja osasta maan kaakkois- ja eteläosia. Sen sijaan lievästi negatiivisia arvoja löytyy Pohjois-Lapista ja Pohjois-Pohjanmaan itäosista.

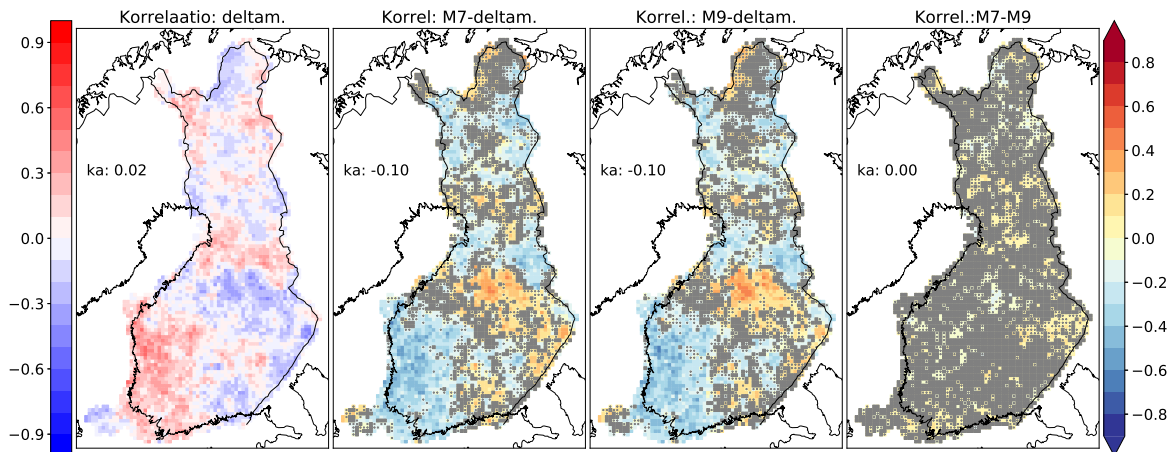
Molemmilla harhankorjausmenetelmillä korrelaatio on keskimäärin pienempää ja alueellisesti tasaisempaa kuin deltamenetelmällä. Negatiivisen korrelaation alueet häviävät sekä M6- että M8-menetelmillä ja suurimmat positiiviset arvot ovat deltamenetelmää pienempiä. Selkeitä alueellisia eroja harhankorjausmenetelmien välillä ei löydy.



Kuva 9.7: Kolmen viikon kuivien jaksojen ja kahden viikon hellejaksojen välinen korrelaatio kaudella 2071-2100. Harhankorjausmenetelmien eroa deltamenetelmään kuvaaviin karttoihin on merkitty harmaa piste, jos mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

Kolmen viikon sateisten jaksojen ja kahden viikon hellejaksojen välinen korrelaatio kaudella 2071-2100 (kuva 9.8) on deltamenetelmällä keskimäärin lähellä nollaa. Heikosti positiivinen alue löytyy länsirannikolta ja suurin negatiivinen alue Pohjois-Savon ja -Karjalan alueelta alueellisen vaihtelun ollessa kaiken kaikkiaan suurta.

Sekä M6- että M8-menetelmillä korrelaatiokerroin on keskimäärin heikosti negatiivinen ja alueellinen jakauma on deltamenetelmää tasaisempi. Tämä tarkoittaa, että keskimäärin harhasta korjatuissa mallisimulaatioissa hellekesinä on hieman normaalia vähemmän sateisia jaksoja koko Suomen alueella.



Kuva 9.8: Kolmen viikon sateisten jaksojen ja kahden viikon hellejaksojen välinen korrelaatio kaudella 2071-2100. Harhankorjausmenetelmien eroa deltamenetelmään kuvaaviin karttoihin on merkitty harmaa piste, jos mallien välinen keskihajonta ylittää keskiarvon ja ruutu on kokonaan harmaa, jos ylitys on vähintään kaksinkertainen.

10 Yhteenveto

Tässä Pro gradu -työssä vertailtiin kolmea eri ilmastomallitulosten alueellistamismenetelmää kolmen eri maatalouden sääindeksin ja kuuden eri ilmastomallin simulaatioiden tulosten avulla. Vertailukaudella 1981-2010 kuivuus- ja sadejaksojen osalta Suomen havaitut keskiarvot ja vuosien väliset keskihajonnat toteutuvat hyvin molemmilla harhankorjausmenetelmillä mutta yleisenä piirteenä alueelliset jakautumat olivat havaittua huomattavasti tasaisempia. Jaksojen jakautuminen vuoden sisällä toteutui kohtuullisesti molemmilla menetelmillä ja alueellisten aikasarjojen korrelaatiota tutkittaessa erot olivat suuria sekä koko maan keskiarvoissa että alueellisesti. Erityisesti negatiivisten alueellisten autokorrelaatiokertoimien puuttuminen oli merkittävä ero havaintoaineistoon verrattuna ja voidaan arvella ilmastomallien karkean alkuperäishilan olevan osasyyn tähän eroavaisuuteen. Kahden viikon hellejaksoja oli vertailukaudella keskimäärin 2,5-kertainen määrä molemmilla harhankorjausmenetelmillä havaintoaineistoon nähden ja erot olivat erityisen suuria eteläisen Suomen alueella. Alueellisilla ilmastomalleilla tehdyissä simulaatioissa on havaittu, että myös Keski-Euroopassa hellejaksot ovat liian pitkiä havaintoihin nähden (Plavcová ja Kysely, 2016). Hellejaksojen ajoittuminen kuukausittain toteutui harhankorjauksessa hyvin ottaen huomioon suuret erot keskiarvoissa.

Tulevaisuuden ilmastomuutoksia tutkittiin käyttäen RCP8.5-skenaariota, koska oletettavasti muutokset maatalouden sääindekseissä ovat siinä kaikista voimakkaimmat. Tässä työssä käytettyjen ilmastomallien ja alueellistamismenetelmien mukaan huhtisyysskuun keskilämpötilan todettiin nousevan noin viisi astetta vuosien välisen hajonnan pysyessä suunnilleen ennallaan. Sademäärän todettiin nousevan keskimäärin noin kymmenen prosenttia ja vuosien välisen hajonnan kasvavan deltamenetelmällä (M3) noin 13%. Hajonnan muutokset olivat keskimäärin M3-menetelmää suurempia molemmilla harhankorjausmenetelmillä: keskimääräinen kasvu M6-menetelmällä noin 19% ja M8-menetelmällä noin 17% ja M6-menetelmän mukaan hajonta kasvaisi paikallisesti maan etelä- ja koillisosissa jopa yli 38%. Vuosien välinen hajonta kasvaa siis kaikilla menetelmillä keskimääräistä sademäärää enemmän.

Laskemalla mallikeskiarvot päivittäisille lämpötiloille ja sademäärille deltamuutosmenetelmällä alueellistettujen ilmastomallisimulaatioiden tuloksista saatiin edelleen deltamenetelmän mukaiset indeksi-arvot. Deltamenetelmällä kolmen viikon kuivuusjaksojen määrä vähenee lähinnä Suomen pohjoispuoliskolla ja väheneminen tapahtuu pääosin huhti-kesäkuussa päättyvillä jaksoilla. Molemmilla harhankorjausmenetelmillä muutosten alueellinen jakauma eroaa hieman deltamenetelmästä mutta mallien välinen hajonta on suuri, mikä aiheuttaa sen, että erot eivät ole merkitseviä suuressa osassa maata. Muutokset vuoden sisäisessä syklissä ovat voimakkaampia harhankorjausmenetelmillä kuin deltamenetelmällä, mikä johtuu todennäköisesti siitä, että sateettomien päivien määrä pysyy käytännössä vakiona deltamenetelmällä. Lehtonen et al. (2014) totesivat kuivuusjaksojen pidentyvän Pohjois-Euroopassa kesällä, mistä näkyy viitteitä kuivuusjaksojen lisääntymisenä harhankorjausmenetelmien mukaan eteläisessä Suomessa kesäkuukausina päättyvinä jaksoina (kuva 7.5). Suuria muutoksia aikasarjojen alueellisessa korrelaatiossa ei tapahdu deltamenetelmän mukaan mutta mielenkiintoista on se, että usealla alueella muutos on harhankorjausmenetelmillä etumerkiltään eri kuin deltamenetelmällä. Sademäärän kasvu ilmastomallien mukaan selittää osittain kuivien jaksojen määrän pienenemisen tulevaisuudessa.

Merkitseviä muutoksia ei kolmen viikon sateisten jaksojen lukumäärässä deltamenetelmällä tapahdu, kun sademäärän raja-arvoa nostetaan keskisademäärän

muutoksen mukaisesti, lukuunottamatta yksittäisiä pisteitä, joissa sadejaksot lisääntyvät. Myös molemmilla harhankorjausmenetelmillä sekä keskiarvon että vuosien välisen hajonnan muutokset ovat pieniä mutta alueellisesti muutokset ovat deltamenetelmää suurempia ja osin etumerkiltään vastakkaisia. Kuukausittaiset muutokset ovat keskimäärin suurempia harhankorjausmenetelmillä kuin deltamenetelmällä ja keskimäärin sadejaksot näyttäisivät lisääntyvän eniten heinäkuussa päättyvillä jaksoilla. Aikasarjojen alueellinen korrelaatio ei keskimäärin juurikaan muutu millään alueellistamismenetelmällä.

Kahden viikon hellejaksojen voidaan todeta olevan haasteellinen indeksi myös muutosten suuruutta tutkittaessa ja mallien välinen hajonta on suurta. Keskimäärin molemmilla harhankorjausmenetelmillä jaksojen määrän kasvu on yli 20% suurempi kuin deltamenetelmällä erojen ollessa suurimmat pohjoisessa Suomessa. Jaksojen määrien muutokset kuukausittain ovat samankaltaiset kaikissa aineistoissa ottaen huomioon erot keskimääräisissä muutoksissa. Harhankorjausmenetelmien mallikeskiarvojen erot deltamenetelmään johtuvat ainakin osittain epälineaarisesta suhteesta keskilämpötilan ja hellejaksojen määrän välillä.

Yleisesti voidaan todeta, että vertailukaudella harhankorjausmenetelmät tuottavat alueellisesti havaintoaineistoa tasaisempia jakaumia mutta muutokset ovat puolestaan deltamenetelmää epätasaisemmin jakautuneet. Ensimmäinen ero voi selittyä ainakin osittain ilmastomallien karkealla hilalla ja toinen ero voisi selittyä deltamuutos- ja harhankorjausmenetelmien periaatteellisilla eroilla. Deltamuutosmenetelmissä tulevaisuuden jaksolla on samat ajalliset ja paikalliset vaihtelut kuin vertailukaudella mutta harhankorjauksessa vertailukausi ja tulevaisuuden jakso ovat toisistaan riippumattomia. Tutkittujen harhankorjausmenetelmien välillä ei systemaattisia eroavaisuuksia löydy vertailukaudella eikä muutosten osalta, ja tulevaisuuden muutoksia tutkittaessa harhankorjausmenetelmät ovat käytännössä aina lähempänä toisiaan kuin deltamenetelmää. Lisäksi mallien välinen hajonta on erityisesti muutosten suuruutta tutkittaessa suuri ja peittää alleen eri menetelmistä aiheutuvia eroja.

Vertailukaudella oli havaintoaineiston mukaan niin vähän hellejaksoja, että pidempi tarkastelujakso saattaisi olla tarpeen. Toisaalta ilmastomuutokset alkaisivat nä-

kyä selvemmin pidemmän tarkastelujakson sisällä, mikä pitäisi ottaa huomioon vuosien välistä keskihajontaa laskettaessa. Tutkimusta voisi jatkaa ottamalla mukaan useampia ilmastomalleja ja mahdollisesti muitakin Räisäsen ja Rädyn (2013) mainitsemia alueellistamismenetelmiä. Vaikka alueellistaminen tuokin lisäarvoa ilmastomallisimulaatioiden tulosten tulkintaan, ei se ole täysin ongelmaton, ja esimerkiksi kvantiilikorjausmenetelmän puutteita harhankorjauksessa ovat tutkineet ainakin Cannon et al. (2015), Lanzante et al. (2018), Maraun et al. (2017) ja Zhao et al. (2016). Lisäksi tilastollisen alueellistamisen ongelmia tulevaisuuden ilmaston ennustamisessa ovat tutkineet Salvi et al. (2017).

Kiitokset

Haluan kiittää tämän tutkielman ohjaajia Kirsti Jylhää ja Jouni Räisästä, sekä Matti Kämäräistä ja kaikkia muita minua työssäni auttaneita. Tutkielma on toteutettu Ilmatieteen laitoksessa osana Suomen akatemian PLUMES-hanketta (Pathways linking uncertainties in model projections of climate and its effects; päätösnumero 278067).

Kirjallisuusluettelo

- Aalto, J., P. Pirinen ja K. Jylhä (2016). "New gridded daily climatology of Finland: Permutation-based uncertainty estimates and temporal trends in climate". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121.8, s. 3807–3823.
- Bindi, M. ja J. E. Olesen (2011). "The responses of agriculture in Europe to climate change". *Regional Environmental Change* 11.1, s. 151–158.
- Cannon, A. J., S. R. Sobie ja T. Q. Murdock (2015). "Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?" *Journal of Climate* 28.17, s. 6938–6959.
- Hakala, K., L. Jauhiainen, S. J. Himanen, R. Rötter, T. Salo ja H. Kahiluoto (2012). "Sensitivity of barley varieties to weather in Finland". *The Journal of Agricultural Science* 150.2, s. 145–160.
- Ilmatieteen laitos, IL (2018a). *Suomen ilmastovyöhykkeet*. URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/suomen-ilmastovyohykkeet> (viitattu 15.05.2018).
- (2018b). *Suomen kasvuvyöhykkeet*. URL: <http://ilmatieteenlaitos.fi/kasvuvyohykkeet> (viitattu 15.05.2018).
- Kämäräinen, M. (2013). "Projections of Future Daily Temperatures in Finland". *Pro gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto*.
- Lanzante, J. R., K. W. Dixon, M. J. Nath, C. E. Whitlock ja D. Adams-Smith (2018). "Some Pitfalls in Statistical Downscaling of Future Climate". *Bulletin of the American Meteorological Society* 99.4, s. 791–803.
- Leander, R. ja T. A. Buishand (2007). "Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows". *Journal of Hydrology* 332.3, s. 487–496.
- Lehtonen, I., K. Ruosteenoja ja K. Jylhä (2014). "Projected changes in European extreme precipitation indices on the basis of global and regional climate model ensembles". *International Journal of Climatology* 34 (4), s. 1208–1222.
- Maraun, D. et al. (2017). "Towards process-informed bias correction of climate change simulations". *Nature Climate Change* 7, s. 765–774.
- McSweeney, C. F., R. G. Jones, R. W. Lee ja D. P. Rowell (2015). "Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions". *Climate Dynamics* 44.11, s. 3237–3260.

- Peltonen-Sainio, P., L. Jauhiainen ja K. Hakala (2011). "Crop responses to temperature and precipitation according to long-term multi-location trials at high-latitude conditions". *The Journal of Agricultural Science* 149.1, s. 49–62.
- Peltonen-Sainio, P., P. Pirinen, M. Laapas, H. Mäkelä, H. Ojanen ja A. Venäläinen (2016a). "Spatial and temporal variation in weather events critical for boreal agriculture: III Frost and winter time fluctuation". *Agricultural and Food Science* 25.1, s. 71–80.
- Peltonen-Sainio, P., P. Pirinen, H. Mäkelä, O. Hyvärinen, E. Huusela-Veistola, H. Ojanen ja A. Venäläinen (2016b). "Spatial and temporal variation in weather events critical for boreal agriculture: I Elevated temperatures". *Agricultural and Food Science* 25.1, s. 44–56.
- Peltonen-Sainio, P., P. Pirinen, H. Mäkelä, H. Ojanen ja A. Venäläinen (2016c). "Spatial and temporal variation in weather events critical for boreal agriculture: II Precipitation". *Agricultural and Food Science* 25.1, s. 57–70.
- Peltonen-Sainio, P. et al. (2016d). "Harmfulness of weather events and the adaptive capacity of farmers at high latitudes of Europe". *Climate Research* 67, s. 221–240.
- Plavcová, E. ja J. Kyselý (2016). "Overly persistent circulation in climate models contributes to overestimated frequency and duration of heat waves and cold spells". *Climate Dynamics* 46.9, s. 2805–2820.
- Riahi, K., S. Rao, V. Krey, C. Cho, V. Chirkov, G. Fischer, G. Kindermann, N. Nakicenovic ja P. Rafaj (2011). "RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions". *Climatic Change* 109.1, s. 33.
- Ruostenoja, K., K. Jylhä ja M. Kämäräinen (2016). "Climate Projections for Finland Under the RCP Forcing Scenarios". *Geophysica* 51.1, s. 17–50.
- Räisänen, J. (2014). *Kasvihuoneilmiö, ilmastomuutos ja vaikutukset*. Luentomoniste, Helsingin yliopiston fysiikan laitos.
- Räisänen, J. ja O. Räty (2013). "Projections of daily mean temperature variability in the future: cross-validation tests with ENSEMBLES regional climate simulations". *Climate Dynamics* 41.5, s. 1553–1568.
- Räty, O., J. Räisänen ja J. S. Ylhäisi (2014). "Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations". *Climate Dynamics* 42.9, s. 2287–2303.

- Rötter, R. P., J. Höhn, M. Trnka, S. Fronzek, T. R. Carter ja H. Kahiluoto (2013). "Modelling shifts in agroclimate and crop cultivar response under climate change". *Ecology and Evolution* 3.12, s. 4197–4214.
- Rötter, R. P., T. Palosuo, N. K. Pirttioja, M. Dubrovsky, T. Salo, S. Fronzek, R. Aikasalo, M. Trnka, A. Ristolainen ja T.R. Carter (2011). "What would happen to barley production in Finland if global warming exceeded 4°C? A model-based assessment". *European Journal of Agronomy* 35.4, s. 205–214.
- Salvi, K., S. Ghosh ja A. R. Ganguly (2016). "Credibility of statistical downscaling under nonstationary climate". *Climate Dynamics* 46.5, s. 1991–2023.
- Solantie, R. (2003). "On definition of ecoclimatic zones in Finland". *Ilmatieteen laitos: raportteja* 2003.2.
- Student (1908). "The probable error of mean". *Biometrika* 6.1, s. 1–25.
- Tao, F., R. P. Rötter, T. Palosuo, J. Höhn, P. Peltonen-Sainio, A. Rajala ja T. Salo (2015). "Assessing climate effects on wheat yield and water use in Finland using a super-ensemble-based probabilistic approach". *Climate Research* 65, s. 23–37.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer ja G. A. Meehl (2012). "An Overview of CMIP5 and the Experiment Design". *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.4, s. 485–498.
- Trnka, M., R. P. Rötter, M. Ruiz-Ramos, K. C. Kersebaum, J. E. Olesen, Z. Žalud ja M. A. Semenov (2014). "Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change". *Nature Climate Change* 4, s. 637–643.
- van Vuuren, D. P. et al. (2011). "The representative concentration pathways: an overview". *Climatic Change* 109.1, s. 5.
- Wilcoxon, F. (1945). "Individual Comparisons by Ranking Methods". *Biometrics Bulletin* 1.6, s. 80–83.
- Zhao, T., J. C. Bennett, Q. J. Wang, A. Schepen, A. W. Wood, D. E. Robertson ja M.-H. Ramos (2017). "How Suitable is Quantile Mapping For Postprocessing GCM Precipitation Forecasts?" *Journal of Climate* 30.9, s. 3185–3196.

LIITE 1: Suomen ilmastovyöhykkeet

Yleisimmin käytetyssä Köppenin ilmastoluokittelussa Suomi kuuluu kostea- ja kylmätalviseen lumi- ja metsäilmastoon. Tämä tarkoittaa, että sadetta saadaan suhteellisen tasaisesti läpi vuoden ja lämpimimmän kuukauden keskilämpötila on yli 10°C ja kylmimmän kuukauden keskilämpötila on enintään -3°C. Tarkemmin tarkasteltuna Suomen ilmasto voidaan jakaa viiteen luokkaan, jotka on esitetty kuvassa L.1 (Ilmatieteen laitos, 2018a).



Kuva L.1: Suomen ilmastovyöhykkeet (Ilmatieteen laitos, 2018a).

Etelärannikko, -saaristo ja Ahvenanmaa kuuluvat hemiboreaalisiin, missä kasvukausi on pitkä ja lehtimetsää tavataan enemmän kuin muualla maassa (ibid.).

Eteläboreaalisiin kuuluu Pohjanlahden rannikko noin Kokkolan korkeudelle saakka ja Järvi-Suomen alue aina itärajalle saakka. Alue on suhteellisen vähäsoista ja myös lehtipuut menestyvät, vaikka yleisempiä ovatkin havupuut (ibid.).

Keskiboreaalissa soiden osuus kasvaa ja metsät muuttuvat havumetsiksi. Kasvukausi on niin lyhyt, että keskiboreaalinen on viljanviljelyn äärialue (ibid.).

Pohjoisboreaalissa kasvukausi on lyhyt ja viileä, joten metsätkin ovat harvempia ja soiden määrä on suurempi kuin etelämpänä (ibid.). Alueen pohjoisreunan määrittää

tunturikoivun kasvuvyöhyke ja sitä karummat kasvuolosuhteet löytyvät ainoastaan hemiarktiselta vyöhykkeeltä, missä tavataan enää varpukasvillisuutta (Ilmatieteen laitos, 2018a).

Maanviljelyn mahdollisuudet noudattelevat ilmastovyöhykkeitä hyvin siten, että parhaat edellytykset viljelylle on hemiboreaalisella alueella, mistä mahdollisuudet heikkenevät kohti pohjoisempia vyöhykkeitä siirryttäessä (Ilmatieteen laitos, 2018b). Lisätietoa ilmastovyöhykkeistä ja niiden määrityksestä tarjoaa Solantie (2003).